

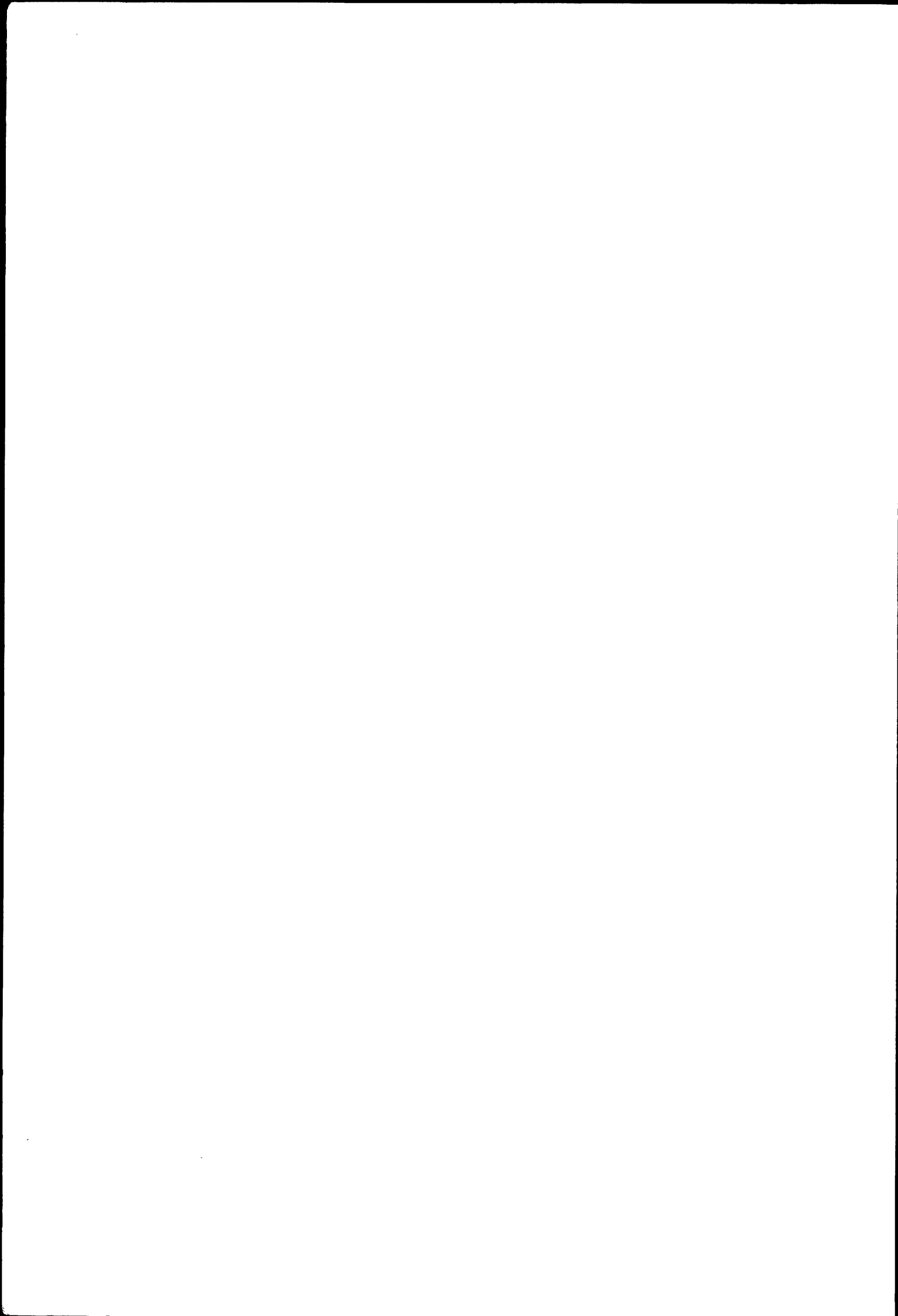
COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE
DU CHARBON ET DE L'ACIER

HAUTE AUTORITÉ

Recherches sur les briques de silice
pour voûtes de fours Martin



Luxembourg, novembre 1958



VIENT DE PARAÎTRE:

**RECHERCHES SUR LES BRIQUES DE SILICE
POUR VOÛTES DE FOURS MARTIN**

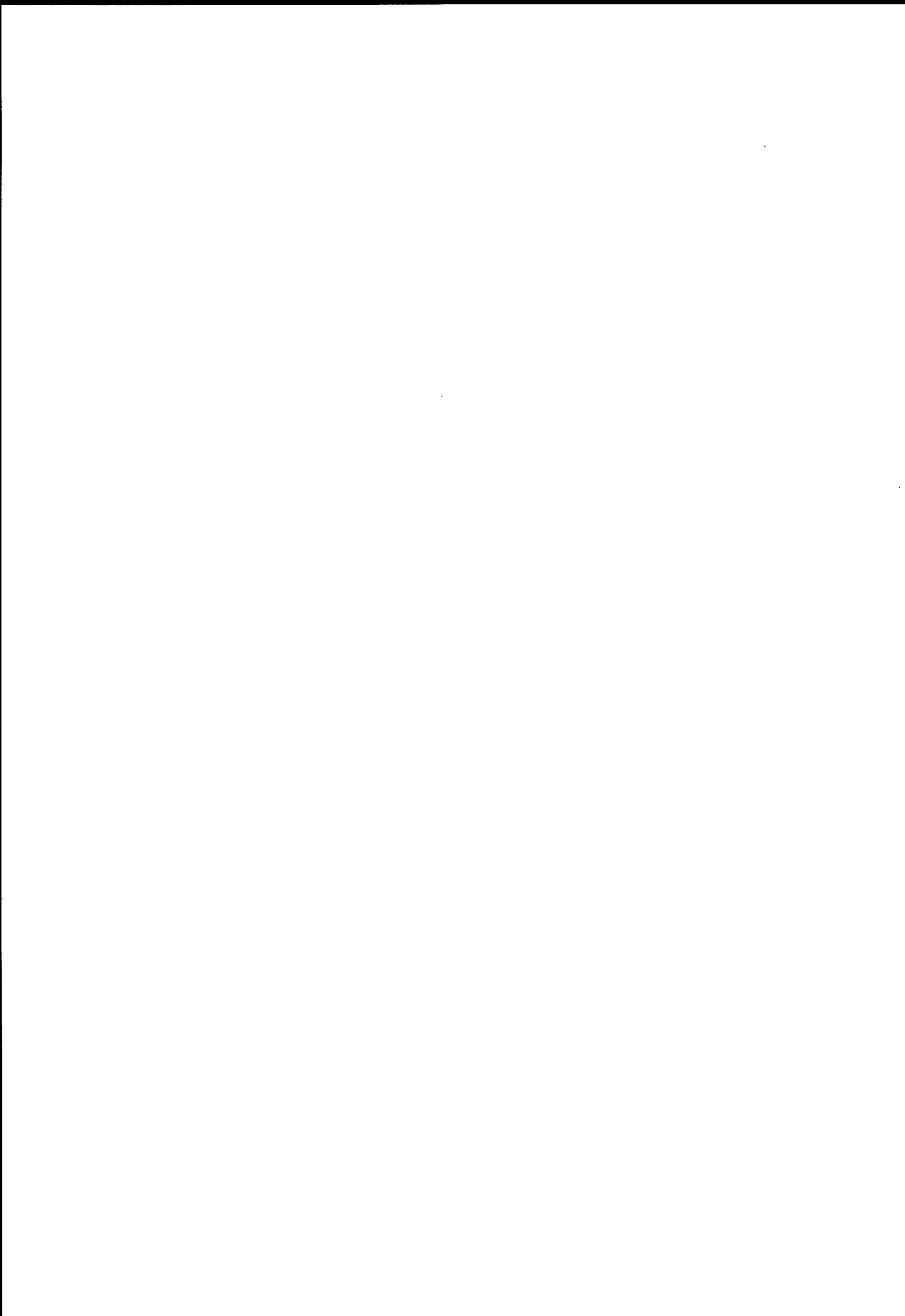
Cette brochure expose les résultats des recherches internationales effectuées sur quatre types de briques de silice dans treize fours appartenant à différentes usines des pays de la C.E.C.A. Il s'agit des premières recherches conduites sur le plan des six pays de la Communauté avec l'aide financière de la Haute Autorité.

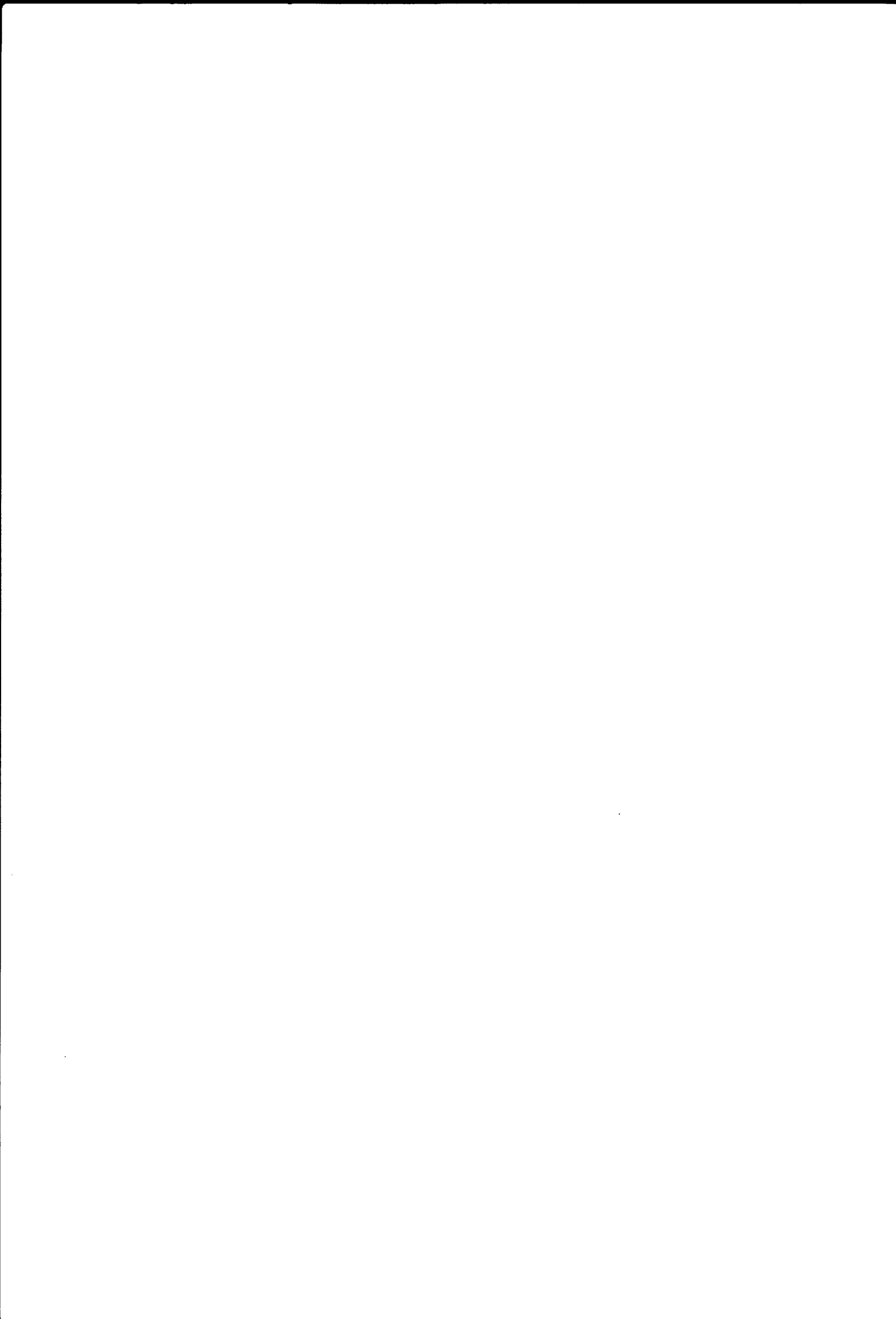
Cette publication contient, entre autres, un exposé des campagnes des fours d'essai, une étude du processus et des facteurs d'usure des briques et un essai d'un indice de qualité.

Elle traite de l'influence sur la tenue des briques des constituants chimiques et des caractéristiques physiques à la fabrication.

Étant donné le caractère hautement technique de cet ouvrage et d'accord avec le comité directeur des recherches, cette brochure n'a été publiée qu'en allemand et en français.

Elle est mise en vente au Service des Publications des Communautés Européennes, bureau de vente, 2, place de Metz, à Luxembourg, au prix de 120 francs belges (1.000 francs français).





COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE
DU CHARBON ET DE L'ACIER

HAUTE AUTORITÉ

Recherches sur les briques de silice
pour voûtes de fours Martin

Luxembourg, novembre 1958

Ce rapport ne contient qu'une bibliographie
réduite aux points essentiels.

Table des matières

	Pages
Avant-propos	7
<i>Chapitre I</i> — Introduction et but des essais	9
<i>Chapitre II</i> — Énoncé du problème — Choix des briques de silice	17
<i>Chapitre III</i> — Plan des essais	19
<i>Chapitre IV</i> — Résultats des essais de laboratoire sur les briques neuves	27
<i>Chapitre V</i> — Méthode de mesure pour la détermination de l'épaisseur des briques	35
<i>Chapitre VI</i> — Comportement des briques dans les voûtes de fours	45
<i>Chapitre VII</i> — Étude statistique des résultats	55
<i>Chapitre VIII</i> — Recherche d'un indice de qualité	63
<i>Chapitre IX</i> — Essais effectués sur des briques usagées	67
Conclusions	89
Adresses des auteurs	91



Avant-propos

La mise en commun des travaux ayant pour but d'améliorer la technique sidérurgique a fait partie depuis longtemps des principales préoccupations des spécialistes des usines. Mais, jusqu'à présent, cette collaboration souhaitée s'était arrêtée d'une façon générale aux frontières des différents pays. On pouvait alors considérer déjà comme un signe de confiance le fait que des spécialistes appartenant à deux pays concurrents envisagent de se réunir pour résoudre des problèmes communs.

Au cours de l'accomplissement des travaux qui sont présentés dans ce rapport, et qui ont pour but l'amélioration de la tenue en service des voûtes de fours Martin, le cadre des recherches menées en commun a pu être considérablement élargi grâce à l'impulsion donnée par la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier. Ceci tient au fait que des spécialistes de tous les pays rattachés à la C.E.C.A. ont participé à l'établissement du programme d'essais et à sa réalisation.

C'est pourquoi, il convient de remercier ici tout particulièrement:

la *Haute Autorité*, qui a apporté une aide efficace à ces travaux, conformément à l'article 55 des statuts de la C.E.C.A.,

les *usines participantes*, qui, avec beaucoup de confiance, ont mis leurs installations à la disposition de la conduite des essais,

et, enfin, tous les *ingénieurs* qui ont réalisé ces travaux en étroite collaboration, malgré de nombreuses difficultés.

Ces travaux ont, en définitive, non seulement résolu des problèmes techniques, mais ont contribué à resserrer, par-dessus les frontières, les liens entre spécialistes.

K. Thomas

Président du comité directeur des recherches



CHAPITRE I

Introduction et but des essais

Par A. RISTOW

(Traduit de l'Allemand)

RÉSUMÉ

Progrès récents dans la technique de construction des fours Martin. Augmentation de la proportion des produits réfractaires basiques pour les voûtes et les parties supérieures des fours, sur le continent européen. Raison de ces essais comparatifs: nécessité d'améliorer la qualité des briques de silices pour voûte de fours Martin. — Organisation des essais, organigrammes des tâches entre des différents pays, usines et techniciens. Critères des allures poussées: production horaire des fours et production par mètre carré de surface de sole des fours Martin récents. — Comparaison de la tenue des voûtes en fonction de leur nature acide ou basique, et de la capacité nominale des fours.

Malgré de nombreux nouveaux procédés d'élaboration de l'acier et les espoirs que fondent sur eux leurs inventeurs, le procédé Martin n'est pas près de disparaître, même dans les pays qui élaborent surtout de l'acier Thomas en raison des conditions de leur sous-sol. Les transformations et perfectionnements du four Martin tendent naturellement dans différents pays vers la construction de nouveaux types de fours⁽¹⁾ et vers l'emploi de plus en plus étendu de briques basiques pour les voûtes, les têtes, les conduites verticales et même pour les parties supérieures des empilages des chambres.

Mais en Amérique du Nord et en Grande-Bretagne, on conserve encore surtout le four construit avec voûte de silice, en particulier pour les fours de grande capacité. La raison en est avant tout le prix très élevé des briques de chrome-magnésie, qui vient encore d'être augmenté tout dernièrement. C'est pourquoi, les aciéries des pays de la C. E. C. A. sont toujours fortement intéressées par le problème de l'amélioration de la tenue des voûtes de silice; cet intérêt n'étant d'ailleurs en aucune manière motivé par le fait que l'abondance de la quartzite, matière première des briques, favorise ces pays.

A l'exception de l'Autriche, qui possède les meilleurs gisements de magnésie, tous les pays ont, de

tout temps, accordé un grand intérêt à la tenue des voûtes de silice de leurs fours Martin, surtout depuis que l'on utilise, même en Europe, de façon croissante des combustibles plus puissants et plus dangereux pour les voûtes, comme le mazout, le goudron et le gaz naturel, tandis que l'on abandonne de plus en plus le chauffage au gaz de gazogène. C'est pourquoi, et malgré les efforts indéniables des fabricants de briques de silice, la tenue des voûtes n'a pas cessé de marquer un recul au cours des dernières dizaines d'années, ceci en raison de l'augmentation de la fatigue en service et du rendement des fours, jointe aux températures plus élevées dues aux nouveaux combustibles.

Pour toutes ces raisons, il y a déjà dix ans environ que fut réalisée en Allemagne une étude en commun menée par des fabricants de briques de silice et par quelques aciéries Martin, en utilisant diverses briques ayant des propriétés différentes. Ces essais ont incité, il y a trois ans, le «VDEh» à faire réaliser des travaux analogues, dans des conditions industrielles les plus diverses, et dans le cadre de la C. E. C. A. Les essais devaient cette fois reposer sur une base aussi vaste que possible dans différents pays.

La Commission de la recherche technique, créée auprès de la Haute Autorité, a proposé à l'unani-

⁽¹⁾ F. Bartu et E. Boelens: «Stahl und Eisen», 76 (1956), pp. 152 à 158. E. Goebel et H. Leopold: «Stahl und Eisen», 77 (1957), pp. 1733 à 1739.

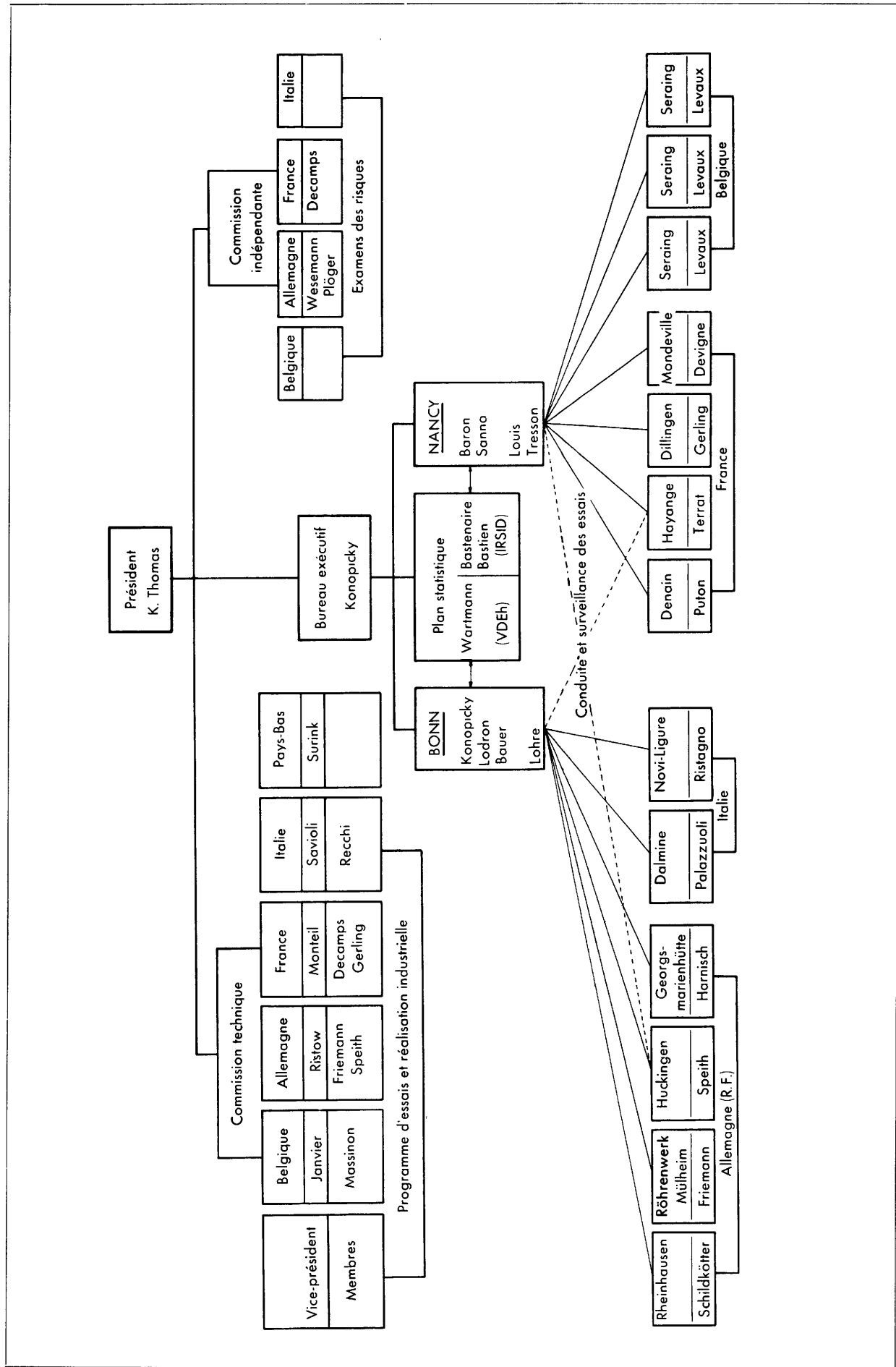


Fig. 1 — Organigramme.

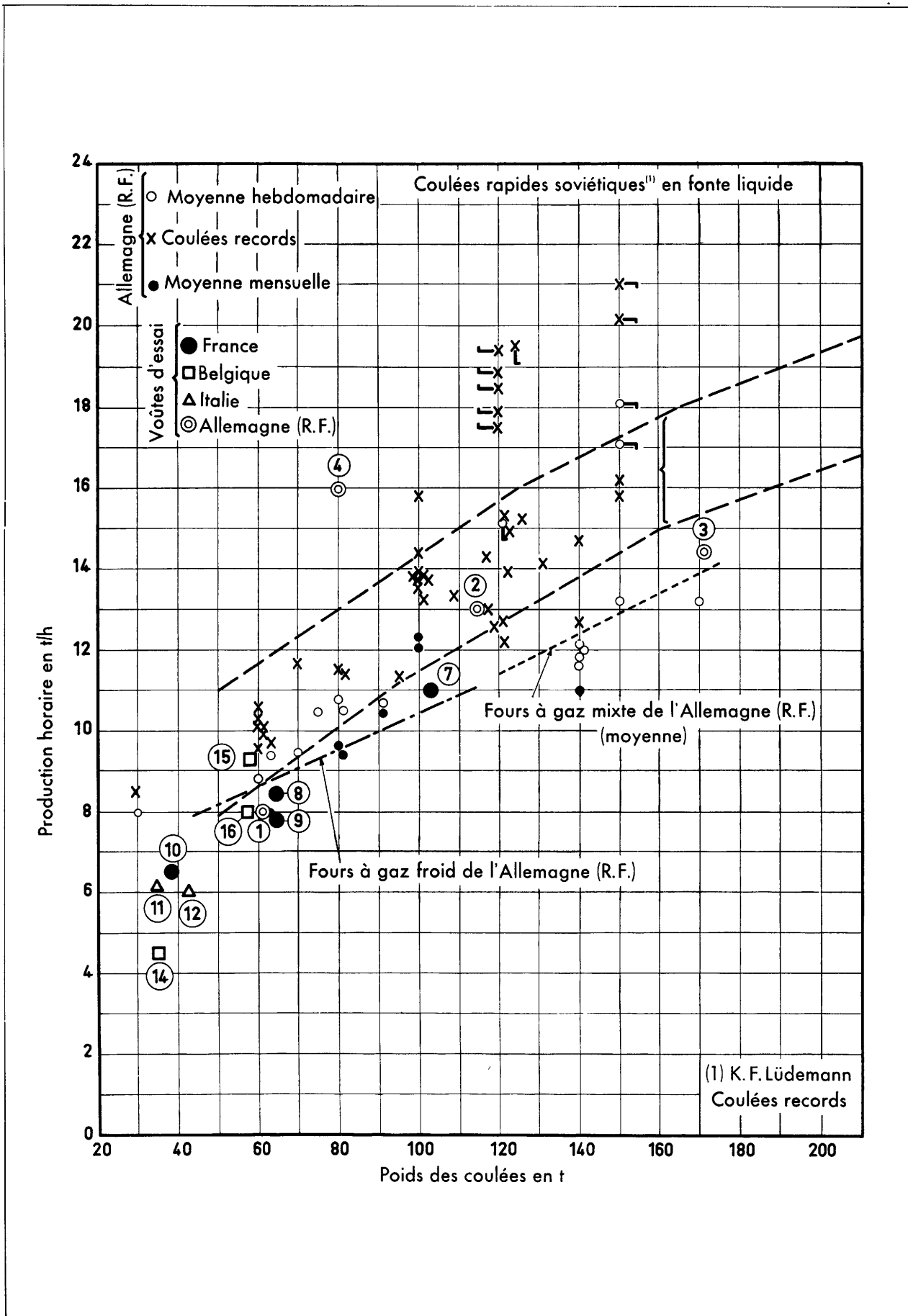


Fig. 2 — Production horaire et poids des coulées des fours Martin en Allemagne (R. F.). [Voir «Stahl und Eisen», 74 (1954), fig. 1, p. 1734.]

mité d'effectuer ces essais, et la Haute Autorité a fourni les capitaux nécessaires à la réalisation de ces travaux, dont l'intérêt a été unanimement reconnu. Pour la conduite de ces travaux, on a formé une commission de représentants des usines belges, allemandes, françaises et italiennes, dont la direction a été confiée à M. K. Thomas, avec comme représentants MM. Ristow, Janvier, Monteil, Savioli (voir l'organigramme de la figure 1).

Les pays participants ont eu l'obligeance de mettre à la disposition de la Commission 13 fours d'essai élaborant des coulées d'un poids allant de 35 à 175 t, de types les plus divers et chauffés avec des combustibles différents.

Il est indispensable, avant d'étudier la tenue des voûtes et d'en tirer des conclusions sur la qualité des briques d'essai utilisées, de s'assurer s'il s'agit d'un four Martin à allure poussée ou à marche lente. Étant donné, d'une part, la faible différence existant entre les températures maxima et, d'autre part, le peu de précision de toutes les mesures de température en service, la production horaire du four est, de l'avis de nombreux spécialistes d'usines, le critère le plus sûr du niveau de la fatigue imposée au four.

16 fours d'essais étaient initialement prévus. Mais au cours des essais, il a fallu retirer trois fours en raison d'un changement de mode de chauffage ou

pour une autre cause, si bien qu'il ne restait plus que 13 fours. (Il manquait les fours n^{os} 5, 6 et 13.)

C'est pourquoi les résultats des 13 fours d'essai ont été comparés aux résultats publiés ces dernières années⁽¹⁾, ainsi qu'aux meilleures productions horaires de fours communiquées à l'échelon mondial (fig. 2 et 4). Sur les figures 2 à 5, on a comparé les résultats des fours de la république fédérale d'Allemagne⁽¹⁾ pour les années 1953 et 1954 avec ceux des 13 fours d'essai, désignés par un numéro d'ordre. La figure 2 représente le rendement horaire en tonnes/heure pour les fours d'essai, comparativement avec les chiffres mensuels ou bien hebdomadaires de la république fédérale d'Allemagne et de Russie⁽¹⁾. Les usines marchant en duplex et celles qui enfournent de la fonte liquide ont naturellement le meilleur rendement (par exemple, le four n^o 4, avec 16 t/h pour une charge liquide à 70 % constituée surtout en duplex). Le four n^o 2 a également une production élevée, avec 13 t/h pour une charge en duplex à 22 %. Les 11 autres fours, ne travaillant pas en duplex, se groupent très bien au voisinage de la courbe des valeurs moyennes d'Allemagne, le four n^o 15 et le four n^o 7 se situant légèrement au-dessus de cette courbe moyenne.

Étant donné que la surface de sole (longueur × largeur) joue un rôle prépondérant dans la production des fours, elle a été portée sur la figure 3 en regard de la production en tonnes/heure. On a

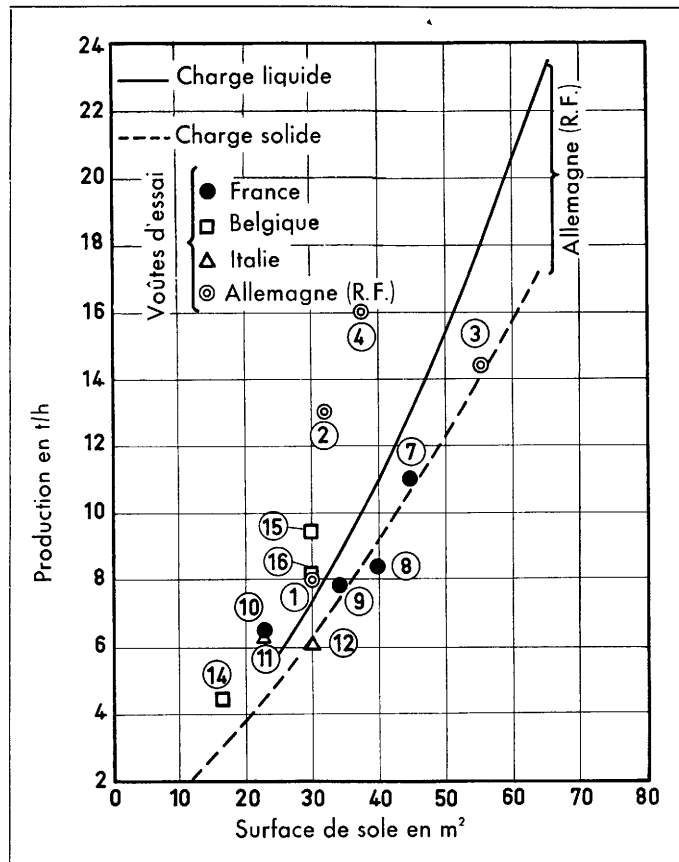


Fig. 3 — Surface de sole et production horaire.

(1) «Stahl und Eisen», 74 (1954), pp. 1734 et 1735.

indiqué sur cette figure les courbes moyennes pour l'Allemagne dans le cas d'une charge solide et dans celui d'une charge en fonte liquide. Le four n° 2 et le four n° 4 (avec une charge en Thomas liquide) se trouvent au-dessus de ces courbes moyennes, puis viennent le four n° 15, le four n° 16, le four n° 1, le four n° 10 et le four n° 11, tandis que les

autres fours d'essai ont, en considération de leur surface de sole, été moins poussés, ce qui doit finalement avoir une répercussion sur la tenue des voûtes.

Étant donné que, dans certains pays, on tend de plus en plus, depuis quelques temps, à prendre comme critère la *production horaire par m² de surface de sole* exprimée en kg/m²/h (ou une carac-

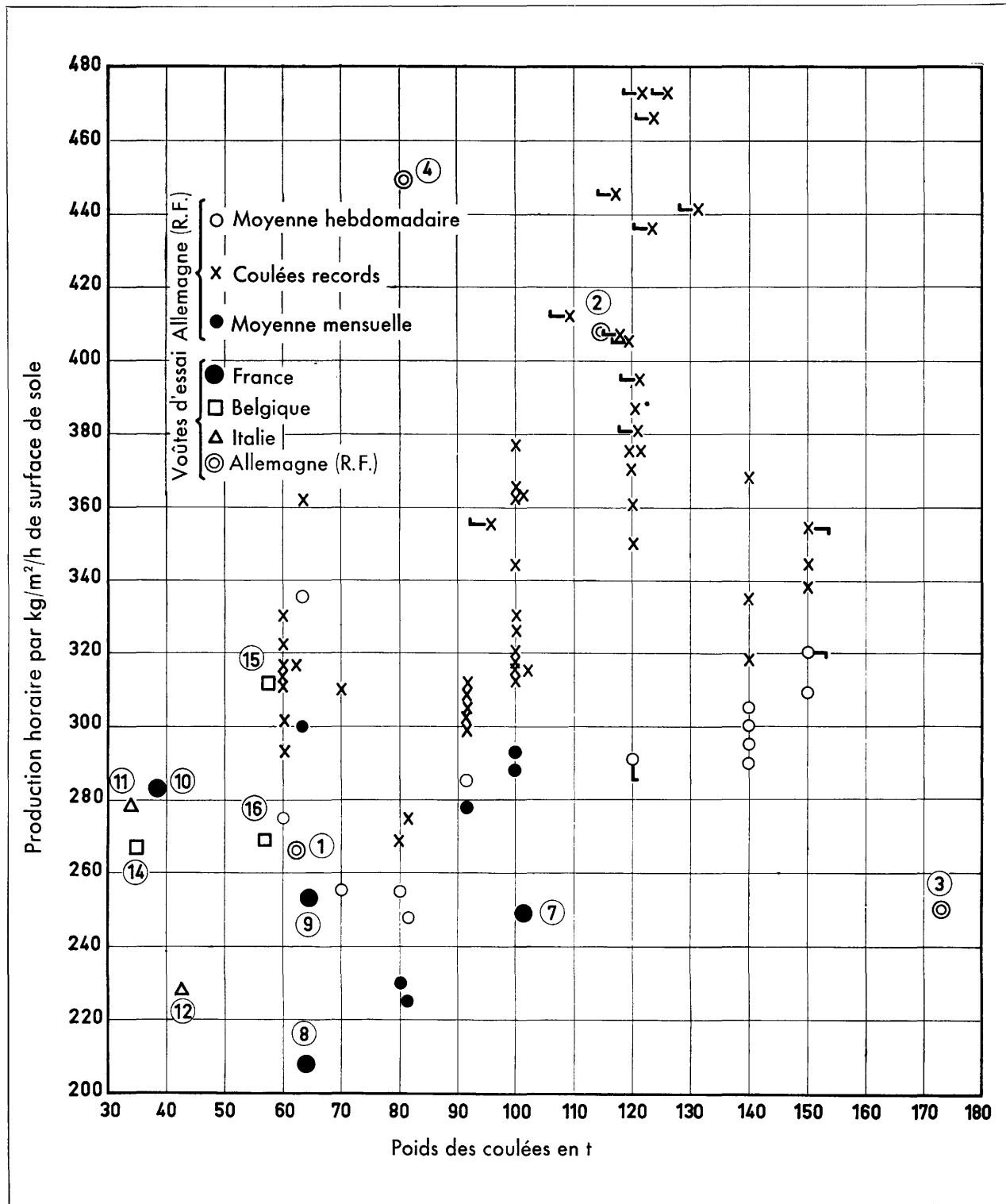


Fig. 4 — Production horaire par m² de surface de sole et poids des coulées des fours Martin en Allemagne (R. F.). [Voir «Stahl und Eisen», 74 (1954), fig. 2, p. 1735.]

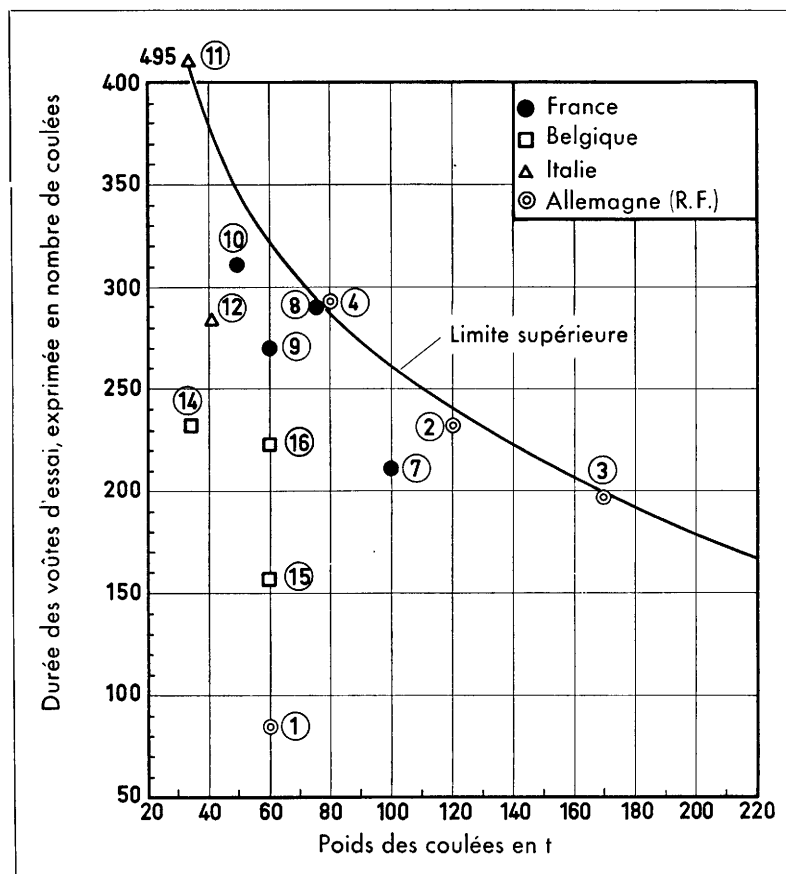


Fig. 5 — Durée des voûtes de silice.

téristique analogue), on a également représenté cette grandeur sur la figure 4. Les fours nos 3, 7, 8, 9 et 12 se trouvent dans la zone inférieure de cette figure, tandis que les autres fours d'essai ont de très bonnes productions par unité de surface de sole. Les deux fours marchant en duplex (n° 2 et n° 4) sont tout à fait dans la partie haute de la figure, comme aussi dans les autres figures.

Les toutes premières enquêtes avaient déjà montré que la *tenue des voûtes* de silice était très imprécise. On a toutefois essayé, sur la figure 5, de déterminer tout au moins une limite supérieure de la durée des voûtes d'essai en fonction du poids des coulées. On sait que les grands fours fixes américains, élaborant des coulées d'environ 250 t, dépassent en moyenne rarement 145 coulées, alors que les petits fours européens, d'une capacité inférieure à 30 t et à garnissage de silice, atteignent souvent 500 coulées dans des conditions de chargement favorables, c'est-à-dire en particulier avec de bonnes ferrailles et un programme de fabrication régulier, ne fatiguant pas trop le four (pas de coulées trop douces). La figure 5 montre en outre que ce sont les fours n° 1, n° 14 et n° 15 qui présentent les moins bonnes tenues de voûtes, parce que, comme le montre la figure 3, ils ont été très poussés.

La même remarque⁽¹⁾, concernant la grande influence de la capacité du four sur la tenue des

voûtes, a été faite aussi pour les fours *entièrement basiques*; les voûtes peuvent en effet souvent supporter 2 000 à 2 500 coulées dans les petits fours de 30 t, alors que, pour de grands fours de 100 t entièrement basiques, on doit se contenter de 900 coulées et que, pour des fours encore plus grands (180 t), la voûte peut rarement dépasser 500 coulées (figure 6).

Pour des raisons faciles à concevoir, on a cherché à évaluer la tenue des voûtes d'après le nombre *d'heures de service* pour chaque voûte d'essai en fonction du poids des coulées et de la surface de sole. Mais on n'a pratiquement obtenu aucune relation. Cela peut signifier que l'usure des voûtes de silice se produit surtout au cours des deux dernières heures de fatigue maximum, lorsque la température à l'intrados de la voûte est proche du point de goutte des briques de silice. Les heures de service par four ne permettent pas d'établir de relation nette, car pendant les longues durées de chargement, en particulier pour les grands fours, la voûte en silice a le temps de se refroidir. Il suffit donc amplement d'établir, comme sur la figure 5, le rapport entre le *nombre de charges* supportées par la voûte de silice et le *poids des coulées*. Malgré le petit nombre de fours, l'exploitation statistique des résultats a montré que les dimensions du four exercent réellement une influence prépondérante sur la tenue de voûte.

(1) L. Hütter: «Stahl und Eisen», 72 (1952), p. 1286.

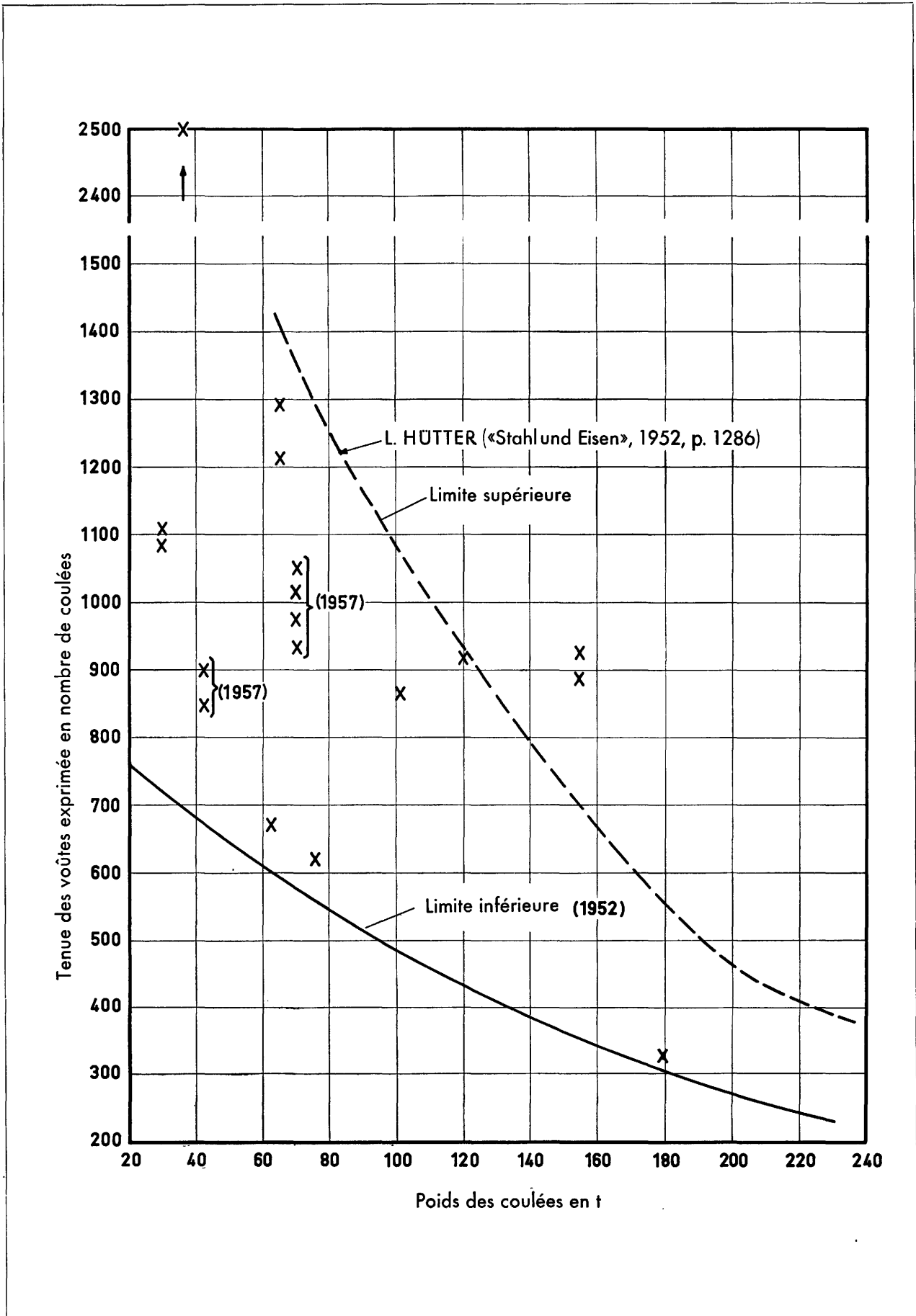


Fig. 6 — Tenue des voûtes pour les trois dernières campagnes des fours (1957) des nouveaux fours Martin de la République fédérale, entièrement basiques et chauffés au mazout.



CHAPITRE II

Énoncé du problème Choix des briques de silice

Par K. KONOPICKY

(Traduit de l'Allemand)

Les essais envisagés avaient pour but la détermination des propriétés caractéristiques fondamentales des briques de voûte de silice. Bien qu'il existe actuellement, dans l'industrie sidérurgique, une tendance à utiliser des voûtes en chrome-magnésie, en raison de la production poussée des fours, il convient de signaler que les expériences qui viennent d'être réalisées en Allemagne⁽¹⁾ et dans d'autres pays montrent que les briques de silice sont plus rentables pour les grands fours que les briques basiques. Le problème posé par la Haute Autorité de la C. E. C. A. n'a donc rien perdu de son actualité.

L'établissement du programme d'essais et le choix des briques d'essais ont été basés sur les expériences⁽²⁾ dont on disposait jusqu'alors; il se posait ainsi quatre questions fondamentales qui méritaient une réponse:

a) Les briques de silice moyennement transformées, qui sont utilisées de préférence en Europe, sont-elles moins bonnes que les briques complètement transformées?

b) Dans quelle mesure la teneur en alumine et la porosité influencent-elles la tenue en service des briques de silice (l'influence défavorable de teneurs élevées en Al_2O_3 dans la brique de silice a toujours été confirmée par les essais faits jusqu'à ce jour)? Comment expliquer les différentes opinions⁽³⁾ ⁽⁴⁾ à ce sujet?

c) TiO_2 doit-il être considéré comme un fondant et, éventuellement, entre quelles limites? Il fallait expliquer les divergences de points de vue sur ce sujet ⁽²⁾ ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾.

d) Quelles sont les méthodes d'essai, ou plus précisément quelles sont les caractéristiques qui sont susceptibles de donner des renseignements précis sur la qualité des briques de silice? On a choisi les quatre types de briques suivants, la combinaison de deux ou plusieurs types de briques devant répondre à l'une des questions posées:

TABLEAU I

Briques	Al_2O_3	TiO_2	Porosité	Poids spécifique
A	m	h	n	n
B	m	m	n	h
C	n	m	m	h
D	n	0	m	n

0 = pratiquement nul m = moyen
n = faible h = élevé

La question a peut être éclaircie par une comparaison des résultats obtenus avec les briques B et C, d'une part (transformation moyenne), et les briques A et D, d'autre part (transformation totale).

La question b peut être éclaircie par la comparaison des résultats des briques A et B, d'une part (faible porosité), et des briques C et D, d'autre part (porosité moyenne).

La question c peut être éclaircie par la comparaison des briques D (pas de TiO_2), B et C (teneur moyenne en TiO_2) et A (teneur élevée en TiO_2).

L'étude des briques fournies a montré qu'il y a, selon ce schéma, certaines différences par rapport

⁽¹⁾ E. Spetzler: Rapport n° 614 de la Commission d'aciérie, «Stahl und Eisen», 76 (1956), pp. 1734 à 1740.

⁽²⁾ K. Konopicky: Comportement des briques de silice dans les voûtes de fours Martin, «Stahl und Eisen», 74 (1954), pp. 1402 à 1413.

⁽³⁾ G. R. Rigby: Briques de silice et de chrome-magnésie dans l'industrie du fer et de l'acier, «Iron and Coal Tr. Rev.», 166 (1953), p. 77.

⁽⁴⁾ R. E. Birch: Les réfractaires pour voûtes de fours, «Proc. nat. Open-Hearth Comm. Iron Steel Div. A.I.M.E.», 27 (1944), pp. 310 à 313.

⁽⁵⁾ T. R. Lynam, A. Nicholson et P. F. Young: «Briques de silice à faible teneur en alumine, IV, Manufacture», Trans. Brit. Ceram. Soc., 51 (1952), pp. 113 à 135.

aux valeurs indiquées sur les prospectus et les devis, ainsi que par rapport aux valeurs données par des essais de contrôle précédemment effectués sur des livraisons antérieures. C'est ainsi que l'on a considéré comme défavorable le fait que les briques A aient une teneur en alumine plus élevée et une porosité un peu plus grande que celles précédemment connues et constatées dans les autres livraisons, et, d'autre part, que les briques B aient un poids spécifique légèrement inférieur à celui des briques C. Il convient toutefois de signaler dès

l'abord que les résultats des essais ont malgré tout conduit aux buts poursuivis.

Pour compléter la recherche, les différents types de briques utilisés pour les différents fours ont été soumis à une étude systématique afin d'obtenir — si possible — des renseignements supplémentaires sur le processus de scorification et de déterminer le sens exact des valeurs fournies par les essais sur les briques au stade de la livraison.

CHAPITRE III

Plan des essais

Par F. BASTENAIRE et M. BASTIEN

RÉSUMÉ

L'objectif essentiel des essais en usine était de comparer la tenue en service de quatre qualités de briques.

En prévision du problème d'interprétation des résultats, ces essais ont été exécutés selon un plan fixé d'avance. Deux paires de bandes d'essai placées symétriquement par rapport à l'axe transversal du four ont été intégrées dans chacune des 13 voûtes.

Pour choisir la nature des bandes d'essai, les fours ont été classés en fonction de leur tonnage et de leur combustible de chauffage. Les bandes ont alors été réparties dans les fours ainsi classés selon le schéma donné par un carré gréco-latin.

Les principaux facteurs dont ce plan permettrait d'étudier les effets étaient:

- la qualité de la brique réfractaire,
- la position de la bande d'essai,
- la nature du combustible de chauffage,
- la capacité du four.

1 — Introduction

La durée de la voûte d'un four Martin dépend de nombreux facteurs. On sait, par exemple, qu'elle est fonction de la nuance de l'acier produit, de la productivité exigée du four, de sa capacité, du combustible utilisé et même de la conduite des opérations.

Les variations des facteurs dont l'action est connue ne suffisent cependant pas à expliquer les différences que l'on constate entre les durées de différentes voûtes. Cette durée est affectée, et les résultats des essais dont il sera ici question le confirment, d'une importante dispersion.

Pour comparer le comportement de deux réfractaires de façon valable, il faut donc disposer relativement à chacun d'eux de plusieurs résultats.

Ce ne serait cependant qu'avec des moyens à la fois assez considérables et assez concentrés que l'on

pourrait répéter, dans des conditions relativement uniformes, des essais industriels dans les fours Martin.

En organisant une recherche coopérative, on parvient à répartir les risques de perturbation de la production sur un plus grand nombre d'usines, mais les conditions des essais deviennent, en même temps, d'autant moins uniformes que le nombre de participants à la recherche est plus grand.

Il faut alors trouver une répartition des essais qui ne soit pas incompatible avec une interprétation correcte de résultats obtenus dans des conditions plus ou moins variées; ceci peut être réalisé en respectant un plan d'expérimentation bien choisi.

Chacun des essais devant être effectué dans des conditions différentes, aucun résultat de mesure de l'usure ne peut être considéré comme absolu, même en admettant qu'il puisse être entaché de dispersion.

L'objectif essentiel ne doit être, par conséquent, que de comparer les uns par rapport aux autres les types de briques étudiés; et puisque les divergences de durée sont dues, pour une grande part, aux différences entre les caractéristiques des fours eux-mêmes ou de leurs modes de fonctionnement, la méthode la plus simple et la plus économique pour effectuer des comparaisons est d'introduire, dans un même four, des briques d'origines différentes.

Des difficultés techniques étant à craindre par suite de l'emploi de briques différentes dans une même voûte, on doit aussi s'efforcer de réduire leur nombre au minimum.

Par sa structure générale, le plan dont nous allons parler pourrait permettre de n'introduire que deux sortes de briques dans chaque four; mais on peut également s'arranger pour en introduire trois, réparties en quatre bandes. Cette dernière solution est celle qui a été adoptée pour les essais.

L'expérience montre que, malgré la symétrie de construction des fours, l'usure d'une voûte est fréquemment dissymétrique au cours d'une campagne donnée et que, dans chaque moitié, elle peut être différente du centre à l'extrémité. Il est donc prudent de faire en sorte qu'il soit possible de tenir compte de la position des bandes dans l'interprétation des résultats.

Enfin, il faut aussi que la dispersion inhérente aux résultats de mesure puisse être chiffrée, une différence entre deux usures ne devant être jugée significative que par rapport à cette dispersion.

2 — Généralités sur le plan des essais

Ce plan permet de comparer la résistance à l'usure de quatre types de briques réfractaires pour voûtes Martin, en regardant comme des facteurs systématiques de cette usure:

- a) Le four, avec toutes ses particularités de construction et d'exploitation au cours de la campagne qui sert de base aux essais;
- b) La région du four dans laquelle une bande de briques d'essais se trouve située (moitié gauche ou droite du four, centre ou extrémité).

Ce plan permet d'étudier en outre l'influence de deux des caractéristiques des fours sur l'usure des voûtes.

Celles qui furent retenues se trouvèrent pratiquement imposées par le choix des fours, choix qui avait été arrêté bien avant celui du plan d'essais. L'examen des caractéristiques des fours permit, en effet, de s'apercevoir, *a posteriori*, qu'ils pouvaient être classés selon leur tonnage et leur combustible de chauffage de façon à étudier l'influence de ces deux facteurs sur l'usure. Même du point de vue de ces deux caractéristiques seules, les classes ainsi constituées ne présentèrent toutefois qu'une homogénéité assez grossière, et rien ne s'opposa à ce que des fours très différents par ailleurs appartenissent à la même classe.

3 — Structure du plan

Le but essentiel de l'étude était de comparer la tenue de quatre sortes de réfractaires et, à l'origine, on avait pu réunir 16 fours Martin en vue de ces essais.

Il fut d'abord envisagé d'associer les briques deux par deux dans chaque four et d'essayer ainsi différentes combinaisons. Cependant, le nombre total des combinaisons différentes de quatre briques deux à deux étant de 6, et 16 n'étant pas divisible par 6, il n'aurait pas été possible de répéter l'essai sur chaque paire de briques un même nombre de fois de façon à obtenir un plan par blocs équilibrés incomplets.

D'autre part, l'interprétation statistique des résultats de l'étude préliminaire d'une voûte ayant montré que l'usure pouvait y être très différente d'un endroit à un autre, on jugea qu'il était nécessaire de tenir compte de la position des bandes. On fut ainsi amené à un plan de type factoriel dans lequel chaque brique serait, dans chaque position, associée à chacune des quatre briques dans l'autre position (tableau II).

Ce plan consistait donc en l'essai de 16 paires de bandes, nombre exactement égal à celui des fours disponibles. On jugea cependant qu'il devait être possible de loger, sans difficultés techniques excessives, quatre bandes d'essai dans chaque voûte. Le plan n'exigeant plus, dans ces conditions, que huit fours, il serait alors réalisé deux fois (voir tableau II).

TABLEAU II

		Position 1			
		A	B	C	D
Position 2	A	AA	BA	CA	DA
	B	AB	BB	CB	DB
	C	AC	BC	CC	DC
	D	AD	BD	CD	DD

Par la suite, le nombre de fours disponibles pour les essais s'étant trouvé réduit à 13, il fallut s'arranger pour faire servir, dans les deux plans à la fois, les résultats obtenus sur certains fours. Les plans restèrent les mêmes dans leur principe, et leur mode d'analyse n'en fut pas changé.

Pour montrer de quelle façon ces plans peuvent permettre d'étudier également les effets de deux facteurs supplémentaires sur l'usure des voûtes (tonnage et nature du combustible), il est commode de désigner la nature du réfractaire d'une bande soit par une lettre latine majuscule, soit par la lettre grecque minuscule correspondante, selon que cette bande se trouve placée en position 1 ou en position 2.

Les éléments du tableau II correspondent alors à ceux du tableau III suivant:

TABLEAU III

		Briques en position 1			
		A	B	C	D
Briques en position 2	α	A α	B α	C α	D α
	β	A β	B β	C β	D β
	γ	A γ	B γ	C γ	D γ
	δ	A δ	B δ	C δ	D δ

On y retrouve, sans omission ni répétition, les éléments d'un carré gréco-latin 4×4 qui peuvent être réarrangés dans l'ordre suivant:

TABLEAU IV

A α	B γ	C δ	D β
B β	A δ	D γ	C α
C γ	D α	A β	B δ
D δ	C β	B α	A γ

Dans ce nouveau tableau, chaque lettre latine et chaque lettre grecque n'apparaît qu'une fois, et une seule, dans chaque ligne et dans chaque colonne. Dès lors, si l'on peut s'arranger pour que tous les essais représentés par les éléments d'une même ligne soient effectués dans des fours chauffés au même combustible, on peut, d'après la théorie du carré gréco-latin, en se basant sur la somme des carrés des différences entre les moyennes de lignes, étudier l'effet du combustible. Si l'on peut simultanément s'arranger pour faire correspondre les colonnes à des classes de tonnage, on peut aussi étudier l'effet du tonnage du four sur l'usure des voûtes.

4 — Répartition pratique des bandes dans les fours

Les fours n'ayant pas été choisis à l'avance de façon à remplir des conditions déterminées, il fallut chercher s'il existait une ou plusieurs répartitions des bandes permettant d'étudier, selon la méthode indiquée plus haut, les effets du combustible et du tonnage.

L'étude complète du tableau des fours classés d'après ces deux critères permit de constituer deux groupes de fours dans chacun desquels il était possible de répartir les bandes d'essai de façon à faire correspondre respectivement aux lignes et aux colonnes du carré gréco-latin des classes de combustibles et de tonnages.

Un premier groupe comprenait les fours 14,15; 10,2; 11,1; 12,16, dans lesquels les bandes furent réparties comme il est indiqué dans le tableau V.

Un second groupe fut constitué en reprenant les fours 10,2; 11,1 et en leur adjoignant les fours 8 et 7 (ou 3), puis 9 et 4; la répartition des bandes figure dans le tableau VI.

Les poids moyens des coulées produites au cours des essais, quoique différents des prévisions, se groupèrent dans chaque classe autour de moyennes assez différentes les unes des autres.

Les tonnages moyens des fours de la première colonne du tableau V furent compris entre 32 et 39 t. Dans la deuxième colonne du même tableau, trois tonnages furent voisins de 60 t, le quatrième étant de 114 t (contre 80 t annoncées).

Dans le groupe II, les tonnages réels des deux colonnes chevauchèrent légèrement les uns sur les autres, le tonnage le plus faible de la colonne de droite ayant été, en fait, inférieur au tonnage le plus élevé de la colonne de gauche.

TABLEAU V
Fours du groupe I

Combustible	Tonnage					
	< 60 t			> 60 t		
	No du four	Moitié gauche	Moitié droite	No du four	Moitié gauche	Moitié droite
Gaz de fours à coke	14	A α	B γ	15	C δ	D β
Gaz mixte	10	B β	A δ	2	D γ	C α
Gaz naturel + fuel	11	C γ	D α	1	A β	B δ
Fuel	12	D δ	C β	16	B α	A γ

TABLEAU VI
Fours du groupe II

Combustible	Tonnage					
	< 80 t			> 80 t		
	No du four	Moitié gauche	Moitié droite	No du four	Moitié gauche	Moitié droite
Gaz de gazogène	8	A α	B γ	7 ou 3	C δ	D β
Gaz mixte	10	B β	A δ	2	D γ	C α
Gaz naturel + huile	11	C γ	D α	1	A β	B δ
Gaz mixte + huile	9	D δ	C β	4	B α	A γ

Nous avons déjà signalé qu'il avait fallu se contenter d'une classification grossière faite d'après des tonnages indiqués avant les essais qui ne coïncident pas avec les tonnages réels. En fait, le tonnage réel moyen fut de 40 t pour les fours de la première colonne du tableau VI et de 89 t ou de 106 t pour ceux de la seconde colonne, selon qu'elle contenait le four 7 ou le four 3. Il y eut donc une

affectée par les erreurs aléatoires qui entachent chacun des résultats à partir desquels elle est calculée; ce n'est pas d'après sa valeur numérique seule qu'il est possible de porter un jugement sur l'influence du facteur correspondant, mais en la comparant à une quantité également calculable, appelée variance résiduelle, qui représente une estimation du carré moyen de l'erreur.

TABLEAU VII
Combustibles réellement utilisés dans les fours du groupe I au cours des essais (¹)

N° du four	Combustible	N° du four	Combustible
14	Gaz de fours à coke	15	Gaz de fours à coke + fuel
10	Gaz de haut fourneau + gaz de fours à coke	2	66 % de gaz de fours à coke + 33 % de gaz de gazogène
11	75 % de méthane + 25 % de fuel	1	70 % de gaz naturel (à 76 % de CH ₄) + 30 % de fuel
12	Fuel	16	Gaz de fours à coke + fuel

(¹) Les pourcentages indiqués correspondent aux calories fournies.

TABLEAU VIII
Combustibles réellement utilisés dans les fours du groupe II au cours des essais

N° du four	Combustible	N° du four	Combustible
8	Gaz de gazogène	7 et 3	3) 78 % de gaz de gazogène + 22 % de fuel
10	Gaz de fours à coke + gaz de haut fourneau	2	7) Gaz de gazogène 66 % de gaz de fours à coke + 33 % de gaz de gazogène
11	75 % de méthane + 25 % de fuel	1	70 % de gaz naturel (à 76 % de CH ₄) + 30 % de fuel
9	Gaz mixte + gaz de gazogène	4	Gaz de gazogène + fuel

forte différence entre les tonnages moyens de classes, par ailleurs assez hétérogènes.

Parallèlement, certaines usines changèrent le mode de chauffage de leur four entre le moment où le plan des essais fut établi et celui où commencent les essais. Dans l'ensemble, les combustibles réellement utilisés par deux fours appartenant dans les tableaux V et VI à une même ligne restèrent cependant voisins. Ils sont récapitulés dans les tableaux VII et VIII.

5 — Exploitation des résultats

a) Méthode générale

Les résultats de ces plans d'essais peuvent être exploités par la méthode statistique connue sous le nom d'«analyse de la variance».

A chaque effet systématique possible d'un facteur, l'analyse de variance fait correspondre une quantité numériquement calculable, appelée variance due à ce facteur. Celle-ci se trouve forcément

D'autre part, l'expression mathématique de la variance due à un facteur quelconque est telle que, lorsque celui-ci n'a pas d'effet, elle constitue une estimation de la variance d'erreur distincte et indépendante de l'estimation fournie par la variance résiduelle. La loi de probabilité du rapport de deux variances étant connue, on peut voir si les valeurs effectivement trouvées à partir des résultats d'expériences sont ou non compatibles avec l'hypothèse que le facteur étudié n'avait pas d'effet. Lorsque ce rapport est supérieur à ce qu'on appelle le seuil de signification, seuil choisi de telle façon qu'il ne soit dépassé en l'absence de tout effet qu'avec une probabilité faible (et donnée d'avance), on peut alors en conclure que le facteur a très probablement un effet réel sur la variable dépendante étudiée. Dans le cas contraire, on dit que l'effet produit n'est pas significatif.

Il ne nous est pas possible de donner, dans le cadre du présent rapport, la démonstration des différentes formules que nous utiliserons. Nous nous

limiterons donc à en donner les expressions théoriques et à présenter le tableau d'analyse de la variance.

b) Réduction des données

Nous verrons ultérieurement, dans le chapitre concernant l'exploitation des résultats, comment l'usure de chaque bande a été caractérisée par un paramètre unique obtenu à partir des mesures réalisées en différents points de cette bande et à des époques échelonnées au cours de la campagne. Le problème ne comporte donc qu'une seule variable dépendante, dont une valeur donnée est associée à chaque bande d'essai.

c) Notations

1) Indices

Il suffit de se reporter au tableau III pour constater que chaque couple de bandes peut être repéré par la donnée de la nature des briques placées respectivement en positions 1 et 2, c'est-à-dire par un système de deux indices j, k , où j représente l'indice de la brique placée en première position et k celui de la brique placée en seconde position.

Les valeurs des deux indices j et k déterminent donc le numéro l de la ligne et le numéro c de la colonne à l'intersection desquelles le couple j, k considéré se trouve dans le carré gréco-latin (tableau IV).

Enfin, les quatre colonnes du carré gréco-latin étant associées deux par deux (tableaux V et VI), on a encore besoin d'un dernier indice t caractérisant le tonnage ($t = 1$ ou 2).

2) Sommes et différences utilisées dans l'analyse de variance

Les différentes sommes de carrés de l'analyse de variance s'expriment entièrement au moyen des qualités suivantes:

D_{jk} : Différence entre le taux d'usure de la bande de qualité j placée en position 1 et le taux d'usure de la bande de qualité k placée en position 2 dans le couple défini par j, k .

S_{jk} : Somme de ces mêmes taux d'usure.

Dans l'exécution des calculs, il intervient:

1° Les sommes des D_{jk} pour une valeur donnée de j (somme des différences d'usure entre les deux bandes de chaque couple de chaque colonne du tableau III):

$$D_j = \sum_k D_{jk}$$

2° Les sommes des différences d'usure D_{jk} pour une valeur donnée de k (somme des différences correspondant aux lignes du tableau III):

$$D_{.k} = \sum_j D_{jk}$$

3° La somme totale des différences:

$$D = \sum_{j,k} D_{jk}$$

4° De façon analogue, les sommes des usures dans les couples où la brique j est en première position:

$$S_j = \sum_k S_{jk}$$

5° Les sommes des usures pour une valeur donnée de k :

$$S_{.k} = \sum_j S_{jk}$$

6° Les sommes des usures correspondant à un combustible donné (c'est-à-dire, à une ligne donnée du tableau IV):

$$S_l = \sum S_{jk} \text{ le long de la ligne } l.$$

7° Les sommes analogues par colonnes:

$$S_c = \sum S_{jk} \text{ le long de la colonne } c.$$

8° Les sommes par tonnages:

$$S_t = \sum S_{jk} \text{ pour tous les demi-fours de même tonnage.}$$

9° La somme générale:

$$S = \sum_{j,k} S_{jk}$$

d) Expressions des termes de l'analyse de variance

Les expressions des sommes de carrés correspondant à chaque facteur sont données dans le tableau d'analyse de variance (tableau IX).

La variance (ou carré moyen) due à chaque facteur est obtenue en divisant la somme des carrés correspondante par le nombre de degrés de liberté (nombre de paramètres indépendants définissant les valeurs de ce facteur dans le plan d'expériences).

Cette analyse de variance n'est pas du type classique le plus simple, parce que trois sortes d'erreurs aléatoires différentes sont susceptibles d'affecter les sommes de carrés.

Ce sont:

1° Les erreurs affectant les différences D_{jk} des taux d'usure de deux bandes situées dans la même moitié d'un four. En dehors des effets systématiques et des erreurs de mesure, ces différences sont essentiellement dues à des particularités internes des fours, de caractère aléatoire (courants aérodynamiques, forme de la flamme, etc.). Elles ne sont affectées que de façon secondaire par les caractéristiques globales des fours dont il est question plus loin, au 3°.

2° Les erreurs résultant des différences d'usure entre les deux moitiés, gauche et droite, d'un même four.

3° Les erreurs responsables des différences d'usure globale des différentes voûtes. Elles sont dues aux différences de construction et d'exploitation des fours (conception générale du four, genre de production, mode de chauffage, allure de la production, etc.).

On comprend sans difficulté, puisque des fours différents interviennent dans les comparaisons de combustibles, que l'estimation de l'effet dû à la position (centre ou extrémité) des bandes dans chaque moitié de four ne peut être affectée que par les erreurs mentionnées au 1°, l'estimation des effets systématiques dus aux combustibles étant, de son côté, affectée par les erreurs mentionnées au 3°.

A priori déjà, on avait pensé que ces trois erreurs seraient d'importances très différentes et seraient probablement dans l'ordre $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$. C'est pour-

quoï, on s'était efforcé d'utiliser un plan d'essai qui en tenait compte, bien que ce ne fût qu'une hypothèse. Nous verrons plus loin qu'elle a été entièrement confirmée par les résultats.

Dans cette analyse de variance, on peut classer les sommes de carrés en trois groupes:

- Celles qui ne sont affectées que par les erreurs du type 1°;
- Celles qui ne le sont que par les erreurs des types 1° et 2°;
- Celles qui le sont à la fois par les erreurs de types 1°, 2° et 3°.

Les expressions des différentes sommes de carrés de l'analyse de variance, groupées dans les trois catégories a, b, c, définies ci-dessus, sont données dans le tableau IX.

Tout effet doit naturellement être testé par comparaison de la variance qu'il introduit avec la résiduelle appartenant au même groupe que lui. Les variances d'erreurs s_a^2 , s_b^2 , s_c^2 peuvent être, par ailleurs, comparées entre elles.

On remarque que les effets «qualités des briques» et «interaction briques \times positions» figurent deux fois, affectés, dans un cas, des erreurs a et, dans l'autre, des erreurs c. Comme la variance résiduelle s_a^2 est beaucoup plus faible que s_c^2 , on a intérêt à tester ces effets au moyen des rapports s_{aq}^2/s_a^2 et s_{apq}^2/s_a^2 , ces tests étant beaucoup plus sensibles.

Remarque

La somme $\sum_{j,k} D_{jk}^2 + \sum_{j,k} S_{jk}^2$ est égale à quatre fois la somme des carrés des 32 observations, parce qu'une décomposition orthogonale devrait faire intervenir les demi-sommes et les demi-différences des observations appartenant à un même couple. Les résultats pratiques des tests de signification ne sont cependant pas modifiés en employant directement sommes et différences, cette opération revenant simplement à changer l'unité de mesure des taux d'usure.

e) Estimation des taux d'usure

Nous avons dit au paragraphe 5, d, que les effets des qualités des briques peuvent être appréciés de deux manières: soit au moyen des différences entre les logarithmes des taux d'usure de bandes situées dans une même moitié de four, soit au moyen de leurs sommes.

Nous avons alors attiré l'attention sur le fait que la variance résiduelle est différente dans ces deux cas, les résultats du dépouillement ayant montré, comme nous nous y attendions, que s_a^2 était beaucoup plus faible que s_c^2 .

Pour comparer les qualités de briques les unes par rapport aux autres, il est préférable de se baser sur les D_{jk} plutôt que sur les S_{jk} . Les résultats ainsi obtenus sont beaucoup plus significatifs et les estimations j_k plus précises. Il est vrai qu'au moyen

TABLEAU IX

Groupe	Facteur de variation	Somme de carrés	Degré de liberté	Désignation de la variance
a	Position	$D^2/16$	1	$S_{a,p}^2$
	Qualité des briques	$\frac{1}{8} \sum_j (D_{.j} - D_j)^2$	3	$S_{a,q}^2$
	Interaction «briques \times positions»	$\frac{1}{8} \sum_j (D_{.j} + D_j)^2 - D^2/8$	3	$S_{a,pq}^2$
	Résiduelle (erreurs a)	$\sum_{j,k} D_{jk}^2 - [\text{Autres sommes de carrés (a)}]$	9	S_a^2
b	Moitiés de fours	$\frac{1}{4} \sum_c S_c^2 - \frac{1}{8} \sum_t S_t^2$	2	S_b^2
	Usure moyenne des voûtes	$S^2/16$	1	$S_{c,m}^2$
	Qualités des briques	$\frac{1}{8} \sum_j (S_{.j} + S_j)^2 - S^2/8$	3	$S_{c,q}^2$
c	Interaction «briques \times positions»	$\frac{1}{8} \sum_j (S_{.j} - S_j)^2$	3	$S_{c,qp}^2$
	Nature du combustible	$\frac{1}{4} \sum_l S_l^2 - S^2/16$	3	$S_{c,l}^2$
	Tonnage du four	$\frac{1}{8} \sum_t S_t^2 - S^2/16$	1	$S_{c,t}^2$
	Résiduelle	$\sum_{j,k} S_{jk}^2 - [\text{Autres sommes de carrés (c) et (b)}]$	3	S_c^2
Total		$\sum_{j,k} D_{jk}^2 + \sum_{j,k} S_{jk}^2 = 4 \text{ fois la somme des carrés des 32 observations}$	32	

des différences D_{jk} , on ne peut pas donner d'estimations des logarithmes des taux d'usures absolus alors que ceci est possible au moyen des sommes S_{jk} .

Cependant, les résultats des essais montrent que l'usure dépend surtout du four. Ceci se manifeste aussi bien par la variance $s^2_{c,t}$ qui représente les effets du tonnage, que par la variance s^2_c , qui englobe les effets de toutes les autres caractéristiques des fours. Le taux d'usure n'est donc pas un résultat absolu et l'on n'estime, au moyen des S_{jk} , qu'un taux d'usure moyen pour les diverses conditions dans lesquelles les essais ont été réalisés. Comme nous verrons, de plus, que les qualités des briques ne sont pas significativement différentes les unes des autres lorsqu'on se rapporte à s^2_c , il est tout à fait inutile de calculer le taux d'usure moyen de chaque qualité de brique.

Les quantités D_{jk} permettent, au contraire, d'estimer l'importance des différences entre les qualités des briques, ces différences ayant beaucoup plus de chances d'être significatives.

Lorsqu'on ne s'intéresse qu'aux différences entre les briques, il est alors possible de représenter les résistances à l'usure par quatre nombres b_j tels que

$$\sum_{j=1}^4 b_j = 0.$$

En utilisant les notations suivantes:

- p_i ($i = 1, 2$): effet dû à la position dans une même moitié de four,
 b_j : effet dû à la brique j ,
 $c_{i,j}$: interaction des effets «briques» et «positions»,
 e_{jk} : terme aléatoire affectant D_{jk} ,

on peut représenter $D_{j,k}$ par l'équation suivante:

$$D_{jk} = p_1 - p_2 + b_j - b_k + c_{1j} - c_{2k} + e_{jk}$$

avec les conditions:

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 &= 0 \\ \sum_j c_{ij} &= \sum_i c_{ij} = 0 \end{aligned}$$

Par application des méthodes générales, on trouve comme estimateur des b_j l'expression:

$$\hat{b}_j = \frac{D_{j.} - D_{.j}}{8}$$

Or, de l'expression de $D_{j,k}$, on déduit que:

$$\begin{aligned} D_{j.} - D_{.j} &= 8 b_j + e_{j.} - e_{.j} \\ &= 8 b_j + \sum_l e_{jl} - \sum_m e_{mj} \end{aligned}$$

En désignant par σ^2 la variance de l'erreur e_{jk} , on peut alors calculer la variance de l'estimation \hat{b}_j :

$$V(\hat{b}_j) = \frac{3\sigma^2}{32}$$

Comme les quantités \hat{b}_j sont indépendantes de la résiduelle s^2_a , le rapport:

$$\frac{\hat{b}_j - b_j}{\sqrt{\frac{3s^2}{32}}} = 4 \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\hat{b}_j - b_j}{s} \right)$$

est distribué (sous l'hypothèse de référence) comme la variable t de Student-Fisher. La relation:

$$|\hat{b}_j - b_j| < s \cdot t_p \sqrt{\frac{3}{32}}$$

définit, pour b_j , un intervalle de confiance au seuil p .



CHAPITRE IV

Résultats des essais de laboratoire sur les briques neuves

Par J. BARON

RÉSUMÉ

Les prélèvements des briques d'essais des quatre types A, B, C, D et des briques habituelles ont été effectués aux fins de détermination des caractéristiques suivantes:

- 1° Résistance à l'affaissement sous charge;
- 2° Détermination des densités-porosités;
- 3° Détermination de la perméabilité;
- 4° Mesure de la dilatation à haute température;
- 5° Résistance à la compression à température ordinaire;
- 6° Analyse chimique.

Des essais complémentaires ont été effectués par le laboratoire de Bonn, notamment en ce qui concerne:

- 1° La répartition des pores;
- 2° La résistance à l'affaissement sous des charges de 2 et 4,5 kg/cm², ainsi que la résistance au fluage;
- 3° L'hétérogénéité chimique de chaque type de brique.

Les résultats de ces essais effectués sur 27 briques A, 36 briques B, 34 briques C, 31 briques D ont montré que la dispersion de tous les résultats était relativement grande pour les briques A, B et C et beaucoup plus faible pour la brique D.

Les caractéristiques principales moyennes des quatre briques d'essais sont données dans le tableau X ci-dessous:

TABLEAU X

Briques	Teneur en Al ₂ O ₃ en %	Teneur en TiO ₂ en %	Porosité en %	Densité absolue	Température de rupture à l'affaissement sous charge
A	0,57	1,41	19,1	2,32	1 637 ° C
B	0,46	0,82	16,5	2,35	1 654 ° C
C	0,26	0,81	22,7	2,39	1 656 ° C
D	0,17	0,03	20,8	2,32	1 689 ° C

Le nombre d'essais effectués sur les briques habituelles n'a pas été suffisant pour permettre de donner des valeurs moyennes. Toutefois, il peut être signalé que ces caractéristiques ont varié dans des limites relativement grandes.

Ces essais ont non seulement montré que la détermination de la résistance à l'affaissement sous charge était une caractéristique insuffisante pour apprécier la qualité d'une brique de silice pour voûte, mais ont également permis de concevoir un indice de qualité (voir chapitre VIII).

SOMMAIRE

1. Prélèvement des échantillons

1.1 Briques d'essais

1.2 Briques habituelles

2. Programme des essais

3. Essais effectués

3.1 Essai d'affaissement sous charge

3.2 Détermination des densités-porosités

3.3 Détermination de la perméabilité

3.4 Mesure de la dilatation à haute température

3.5 Résistance à la compression à température ordinaire

3.6 Analyse chimique

4. Résultats des essais sur les briques d'essais

5. Résultats des essais sur les briques habituelles

5.1 Briques habituelles des fours allemands, italiens, français et belges (Nancy)

5.2 Briques habituelles des fours allemands (Bonn)

6. Conclusions

7. Essais complémentaires effectués à Bonn

Annexe I — Répartition des pores dans les briques d'essais

Annexe II — Essais d'affaissement sous charge

Annexe III — Variations locales de la composition chimique des briques de silice

1. Prélèvement des échantillons

1.1 Briques d'essais

Les bureaux exécutifs de Bonn et de Nancy ont prélevé les briques nécessaires aux essais aux quatre

lieux d'arrivée: Duisbourg, Gênes, Liège, Strasbourg. Les prélèvements ont été faits au hasard par four pour chacun des formats proportionnellement au nombre total des briques, et dans chaque lot de quatre briques une brique a été tirée au sort sur laquelle les essais ont été effectués. Les essais ont été faits sur 27 briques A, 36 briques B, 34 briques C, 31 briques D. Chaque brique soumise à l'essai a été découpée en deux parties et chacune de ces deux moitiés était destinée à chacun des deux laboratoires.

1.2 Briques habituelles

Au moment de la construction de chaque voûte, il a été prélevé un certain nombre de briques habituelles. Chacune d'elles a été également découpée en deux parties. Tous les essais sur ces briques (essais physiques et analyses chimiques) ont été effectués à Nancy.

2. Programme des essais

Les analyses chimiques ont été effectuées à Bonn pour les échantillons C et D et à Nancy pour les échantillons A et B. En outre, un certain nombre d'analyses de recoupe ont été effectuées dans les deux laboratoires. En ce qui concerne les essais physiques, la majeure partie a été effectuée à Nancy et les résultats donnés dans ce rapport sont ceux obtenus à Nancy.

3. Essais effectués

3.1 Essai d'affaissement sous charge

Cet essai a été effectué selon le programme de la norme française NF B. 49-105, c'est-à-dire avec une éprouvette de 50 mm de hauteur et de 34 mm de diamètre et une loi de montée de température de 1 000° pendant la première heure et de 250°/heure au-delà. Par contre, contrairement aux prescriptions de la norme française, la température de l'éprouvette a été prise au milieu de la face supérieure par suite de la quasi-impossibilité de faire cette mesure correctement au milieu d'une génératrice; d'autre part, seules les températures de rupture ont été prises en considération.

3.2 Détermination des densités et des porosités

Cet essai a été effectué selon la norme française NF B. 49-104. Toutefois, pour la détermination de la densité absolue, il a été employé un voluméno-

mètre décrit dans «Chimie analytique», vol. 33, n° 10 octobre 1951, p. 295.

3.3 Détermination de la perméabilité

La perméabilité a été déterminée sur une éprouvette cubique dans les trois directions; l'appareil utilisé a été décrit au XXVII^e Congrès international de chimie industrielle («Compte rendu», tome III, p. 133) de Bruxelles. Toutefois, étant donné que les briques de silice présentent souvent des fissures internes, c'est le chiffre minimum qui, seul, a été retenu, c'est-à-dire la valeur la plus basse obtenue dans les déterminations selon les trois directions.

3.4 Mesure de la dilatation à haute température

Cet essai a été effectué sur une éprouvette cylindrique de 100 mm de longueur et de 16 mm de diamètre; l'appareil utilisé est décrit dans le «Bulletin de la Société française de céramique», n° 18, janvier-mars 1953.

3.5 Résistance à la compression à température ordinaire

Cet essai a été effectué selon les prescriptions de la norme française NF B. 49-103, à l'exception de la vitesse de mise en charge qui a été ramenée de 15 kg/cm²/s à 2 kg/cm²/s. L'essai a été effectué sur 3 ou 5 cubes selon les possibilités et seul le chiffre médian a été retenu.

3.6 Analyse chimique

On a vu que les analyses chimiques ont été effectuées à Bonn pour les échantillons C et D et à Nancy pour les échantillons A et B; mais les deux laboratoires s'étaient mis préalablement d'accord sur la méthode d'analyse et, malgré quelques dispersions accidentelles, on peut considérer que l'homogénéité des résultats dans l'état actuel des choses

est satisfaisante. La méthode d'analyse utilisée résulte d'un compromis entre les différentes normes américaines, anglaises, italiennes et françaises.

4. Résultats des essais sur les briques d'essais

Les résultats des essais ont été notés dans des tableaux tant pour les briques d'essais que pour les briques habituelles; à partir de ces tableaux, on a établi quelques histogrammes, dont les plus intéressants relatifs aux briques d'essais sont donnés dans les figures suivantes:

- Figure 7: Teneur en alumine
- Figure 8: Porosité totale
- Figure 9: Densité absolue
- Figure 10: Teneur en oxyde de titane
- Figure 11: Température de rupture — affaissement sous charge

5. Résultats des essais sur les briques habituelles

Les tableaux ci-joints donnent la valeur des caractéristiques essentielles des briques habituelles:

- Tableau XI: Caractéristiques principales des briques habituelles des fours allemands (chiffres de Bonn)
- Tableau XII: Caractéristiques principales des briques habituelles des fours allemands (chiffres de Nancy)
- Tableau XIII: Caractéristiques principales des briques habituelles des fours français
- Tableau XIV: Caractéristiques principales des briques habituelles des fours belges
- Tableau XV: Caractéristiques principales des briques habituelles des fours italiens

Il est intéressant de noter que les briques habituelles E ont des caractéristiques qui conduisent

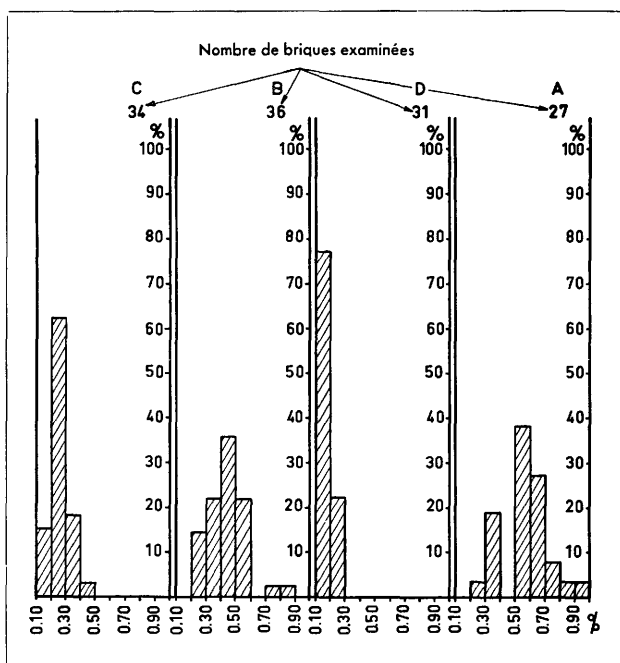


Fig. 7 — Teneur en alumine.

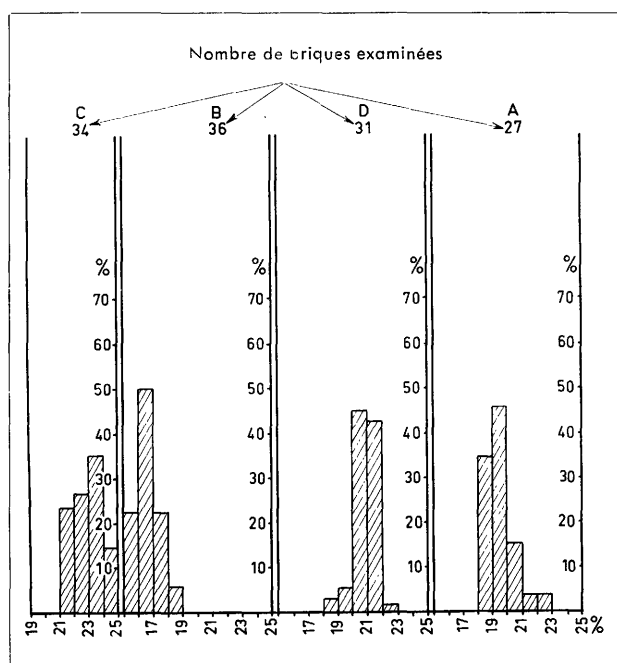


Fig. 8 — Porosité totale.

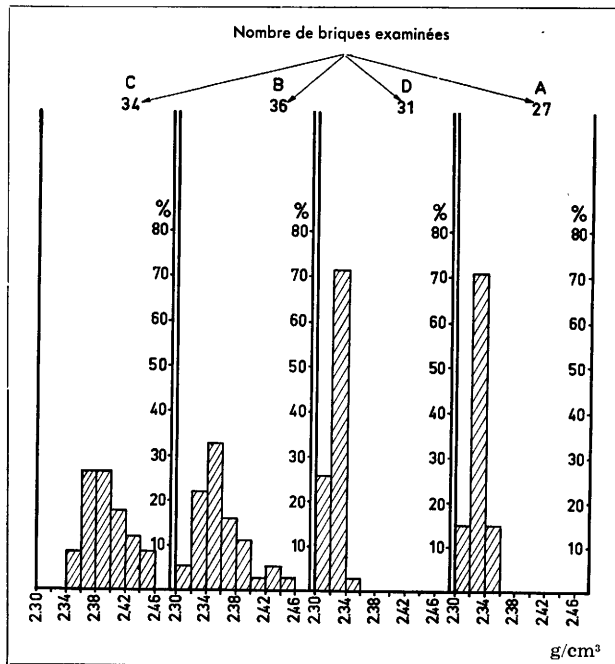


Fig. 9 — Densité absolue.

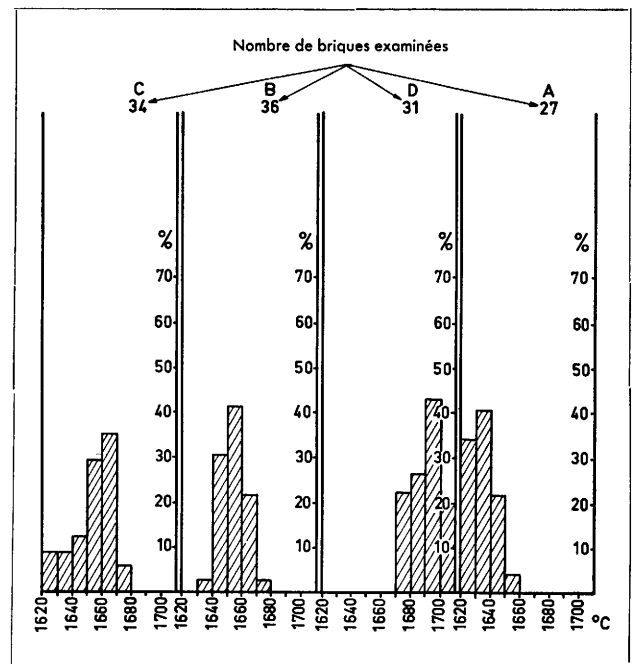


Fig. 11 — Affaissement sous charge. Température de ramollissement.

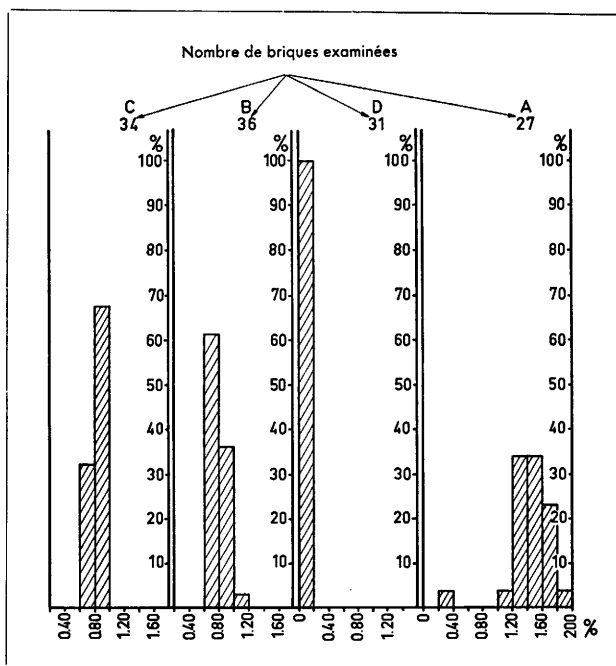


Fig. 10 — Teneur en titane.

à un indice de qualité très bas, tout à fait en accord avec leur bon comportement au cours des essais.

6. Conclusions

La conclusion majeure qui découle des essais de laboratoire est évidemment la recherche d'une relation entre les caractéristiques des briques et leur tenue en service. En d'autres termes, il est très important de pouvoir déterminer un indice de

qualité des briques de silice pour voûtes de four Martin (voir chapitre VIII: «Recherche d'un indice de qualité»).

La deuxième conclusion qui s'impose concerne les laboratoires. Puisque l'influence de l'alumine semble si importante, il y a lieu d'attirer l'attention sur ce dosage et de rechercher des méthodes précises d'analyse. Sans entrer ici dans les détails, la question a été étudiée en Allemagne et en France et elle a reçu des solutions satisfaisantes⁽¹⁾.

Dans le même ordre d'idées, il est peut-être aussi possible de trouver un essai de laboratoire qui fasse la synthèse des caractéristiques retenues (teneur en alumine, porosité, degré de transformation). Cet essai reste à trouver pour le moment.

7. Essais complémentaires effectués à Bonn

Annexe I — Répartition des pores dans les briques d'essais

Le laboratoire de Bonn a déterminé la répartition des pores sur les briques d'essais par la méthode de compression à l'aide du mercure. La figure 12 donne les résultats obtenus. On note une grande dispersion des gros pores, en particulier pour la brique D. Les briques B et C ont moins de gros pores, tandis que la brique A présente des pores moyens.

Ces résultats sont en accord avec les mesures de la perméabilité aux gaz, qui dépend surtout du nombre de gros pores.

Annexe II — Essais d'affaissement sous charge

Le laboratoire de Bonn a également procédé à des essais de résistance à l'affaissement sous charge avec une vitesse de chauffe de 10°/minute et des

(1) Voir en particulier la communication de P. Thiery et J. Baron, faite au XXX^e Congrès de chimie industrielle à Athènes: Analyse chimique des briques de silice pour

TABLEAU XI

Caractéristiques principales des briques habituelles des fours allemands ⁽¹⁾

Four	Brique	Densité absolue	Porosité totale en %	Al ₂ O ₃ en %	TiO ₂ en %
1	J	2,36	19,8	0,84	1,16
		2,40	25,0	0,72	1,04
		2,34	22,2	0,69	1,28
2	H	2,37	18,6	0,43	0,90
		2,38	18,9	0,37	0,66
		2,33	17,1	0,52	0,82
		2,42	19,8	0,45	0,58
3	H	2,37	19,8	0,41	0,69
		2,44	22,1	0,41	0,72
		2,36	19,5	0,67	0,80
		2,38	19,8	0,39	0,66
4	H	2,34	21,3	0,30	0,61
		2,40	18,8	0,30	0,76

(¹) Les caractéristiques données ici ont été déterminées au laboratoire de Bonn.

TABLEAU XII

Caractéristiques principales des briques habituelles des fours allemands ⁽¹⁾

Four	Brique	Densité absolue	Porosité totale en %	Al ₂ O ₃ en %	TiO ₂ en %
1	J	2,35	22,9	1,04	0,99
		2,39	23,4	0,88	0,90
		2,33	24,2	0,91	1,09
2	H	2,36	17,9	0,67	0,80
		2,37	19,7	0,55	0,60
		2,33	15,9	0,53	0,88
		2,42	20,7	0,56	0,58
3	H	2,36	21,0	0,49	0,64
		2,41	20,7	0,77	0,66
		2,34	19,0	0,75	0,85
		2,41	20,6	0,49	0,59
4	H	2,33	21,8	0,28	0,58
		2,37	20,0	0,49	0,62

(¹) Les caractéristiques données ici ont été déterminées au laboratoire de Nancy.

charges de 2 et 4,5 kg/cm². La figure 13 donne les résultats obtenus. Ces résultats montrent que la brique D a le meilleur comportement, tandis que les trois autres briques ont des résistances qui décroissent dans l'ordre C, B et A. On a noté un même classement pour la résistance pyroscopique et la résistance à l'affaissement sous charge. Pour comparer plus efficacement la résistance à l'affaissement sous charge, on a pris en considération la vitesse de fluage à différentes températures, ce qui révèle la distinction très nette entre les briques D,

TABLEAU XIII

Caractéristiques principales des briques habituelles des fours français

Four	Brique	Densité absolue	Porosité totale en %	Al ₂ O ₃ en %	TiO ₂ en %
7	F	2,46	21,9	0,58	0,16
8	G	2,35	24,1	0,58	0,96
9	H	2,34	16,6	0,29	0,86
		2,34	21,0	0,29	0,66
10	G	2,37	21,2	0,22	0,86

TABLEAU XIV

Caractéristiques principales des briques habituelles des fours belges

Four	Brique	Densité absolue	Porosité totale en %	Al ₂ O ₃ en %	TiO ₂ en %
14	E	2,39	20,3	0,51	0,28
		2,40	17,8	0,37	0,31
		2,39	17,0	0,37	0,32
16	E	2,44	18,7	0,19	0,31
		2,33	16,4	0,31	0,30
		2,35	17,1	0,31	0,30

TABLEAU XV

Caractéristiques principales des briques habituelles des fours italiens

Four	Brique	Densité absolue	Porosité totale en %	Al ₂ O ₃ en %	TiO ₂ en %
12	K	2,33	20,2	0,51	0,19
		2,32	22,4	0,55	0,22
		2,33	25,6	0,51	0,19

d'une part, et B, C et A, d'autre part (figure 14); aux températures inférieures à 1630 °, la vitesse de fluage est tellement faible que l'essai est trop imprécis. Au cours de cet essai, c'est la brique D, très pauvre en fondants, qui donne les valeurs les plus élevées.

Une comparaison des essais d'affaissement sous charge en atmosphère oxydante, en employant un four à résistance de graphite chemisé par un tube d'alumine et en atmosphère très réductrice (four à charbon granulé et poussoirs en graphite), montre des différences croissantes au fur et à mesure que la teneur en oxyde de titane augmente (tableau XVI). On peut supposer que le mauvais comportement des éprouvettes au cours des essais en atmosphère fortement réductrice pourrait être dû à la formation de

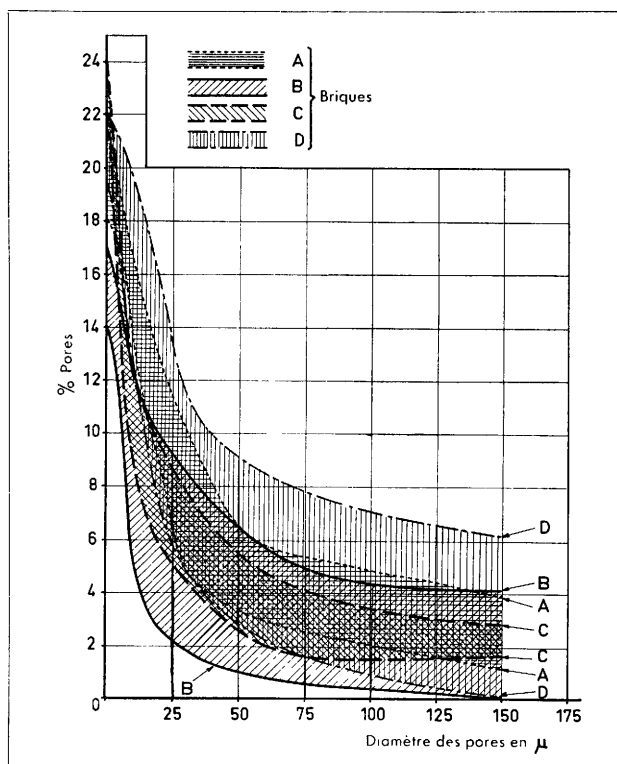


Fig. 12 — Domaine de dispersion des répartitions des grosseurs des pores.

sous-oxyde de titane (TiO). Lorsque la fusion des éprouvettes est réalisée dans l'air, on constate une coloration blanche si l'oxyde de titane est en défaut et bleu-verdâtre au fur et à mesure que la teneur en oxyde de titane augmente.

L'examen des résultats des essais de résistance à l'affaissement sous charge effectués selon des méthodes différentes montre que le comportement de la brique D est de beaucoup supérieur à celui des trois autres briques d'essais.

Il faut attirer l'attention sur le fait que les briques B, C et D se sont comportées de même, tandis que le comportement de la brique A a été beaucoup plus mauvais que celui des trois autres qualités. On peut donc conclure que la résistance à l'affaissement sous charge et le comportement au fluage d'une brique de silice ne sont pas des caractéristiques suffisantes pour déterminer la qualité.

Annexe III — Variations locales de la composition chimique des briques de silice

Chaque demi-brique des différentes qualités A, B, C et D a été découpée en 75 cubes égaux (volume 4 cm³ environ) et chaque troisième cube a été examiné. Les résultats d'analyse ont été portés dans des tableaux desquels on a pu déterminer les limites extrêmes de composition des principaux éléments (tableau XVII).

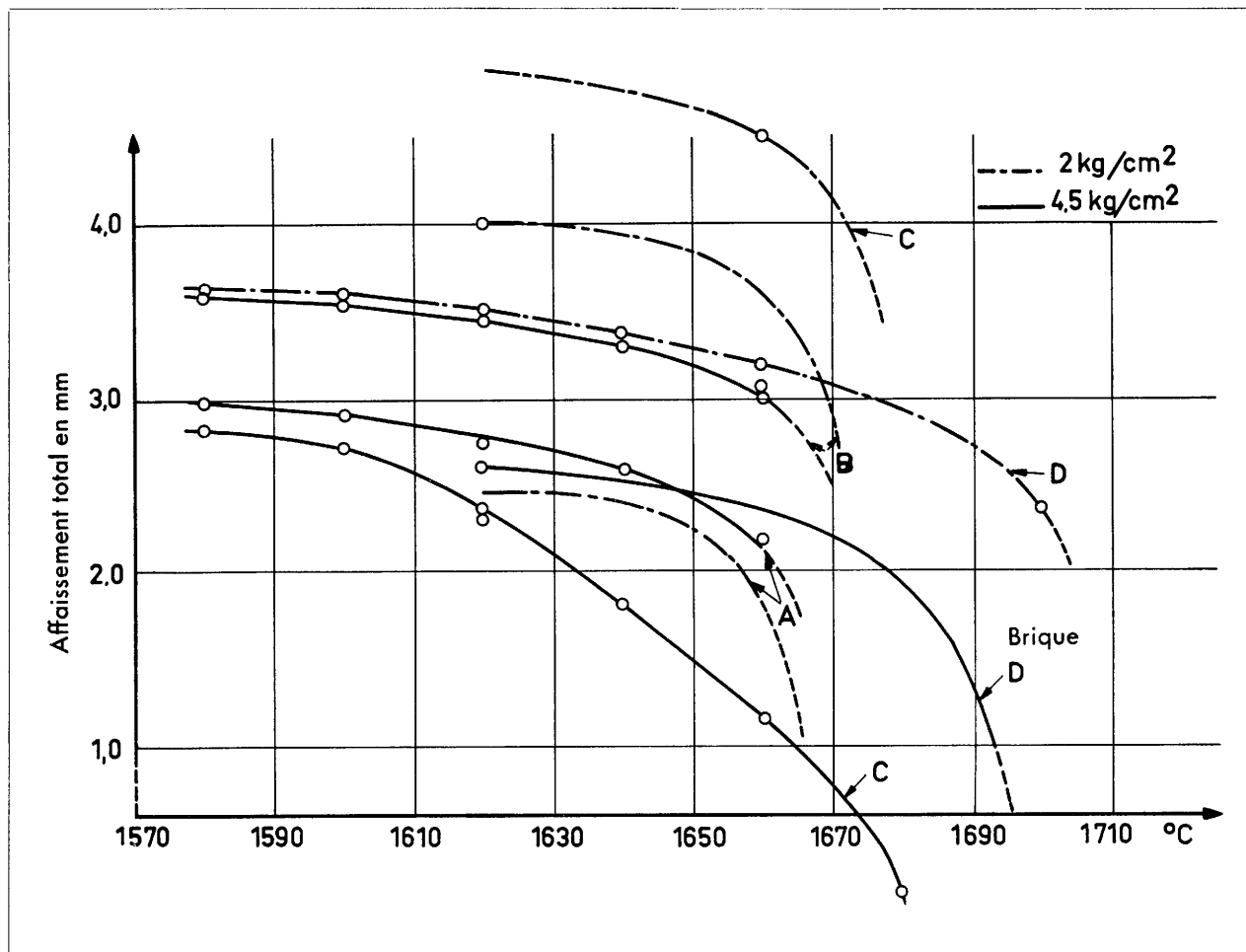


Fig. 13 — Affaissement sous charge des briques de silice. Vitesse de montée en température 1 °C/min.

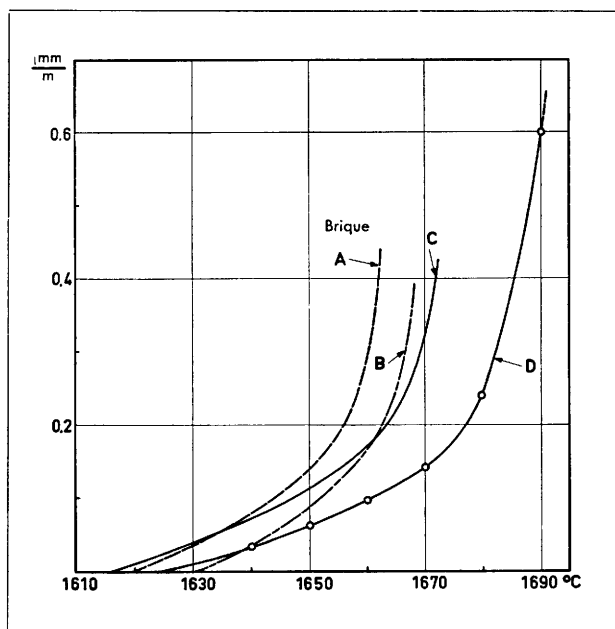


Fig. 14 — Vitesse de fluage en mm/m. min.

TABLEAU XVI

Résultats comparatifs d'essais d'affaissement sous charge Nancy—Bonn

		Brique A	Brique B	Brique D
Nancy	— 0,5 %	1 615—1 650 ° C	1 630—1 665 ° C	1 670—1 700 ° C
Bonn	t_a (— 0,6 %)	1 650 ° C	1 675—1 680 ° C	1 680—1 690 ° C
Nancy	t_b	1 625—1 660 ° C	1 645—1 675 ° C	1 675—1 710 ° C
Bonn	t_b	1 660 ° C	1 685—1 690 ° C	1 690—1 700 ° C

Éprouvette: Diamètre: 35 mm
Hauteur: 50 mm

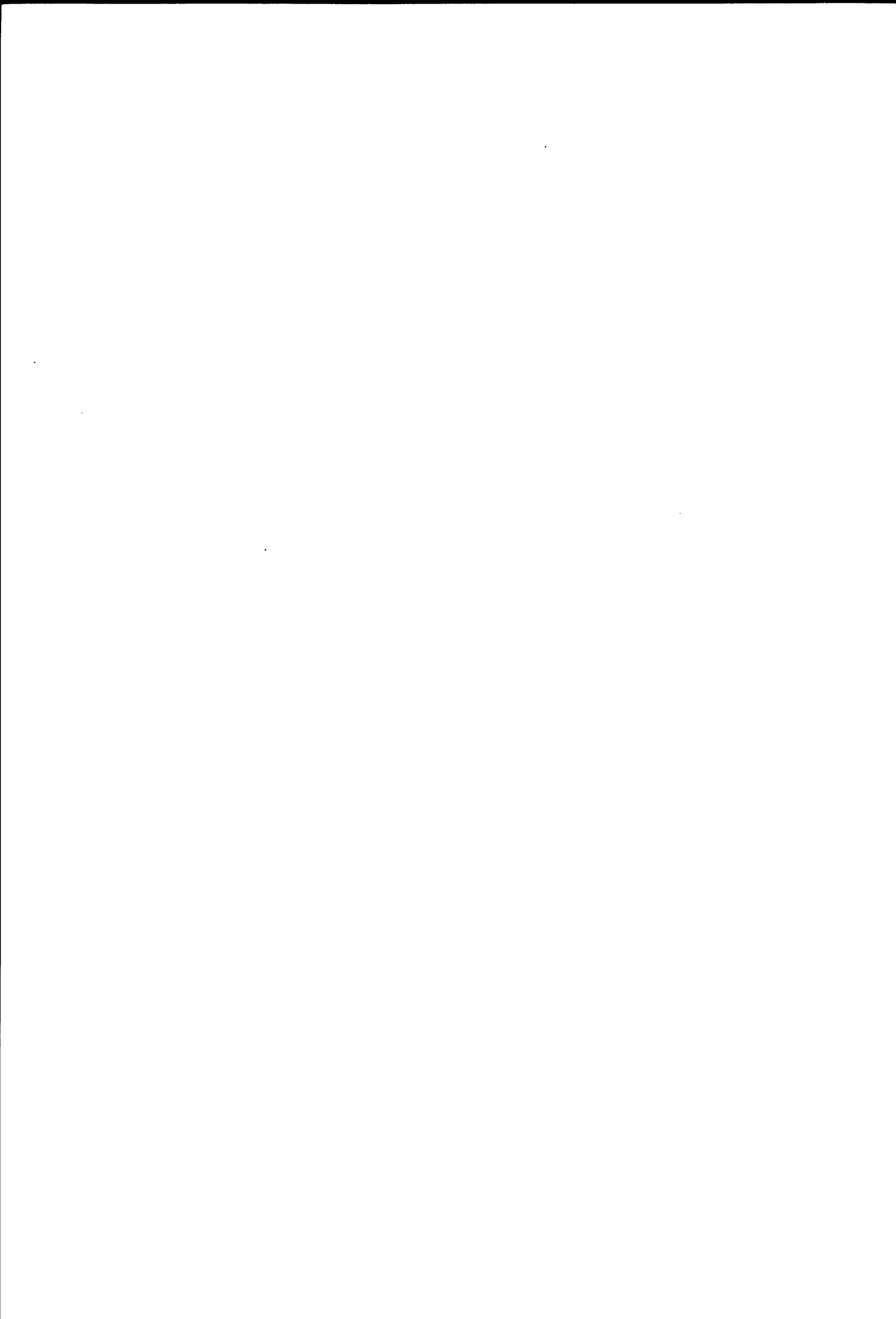
Vitesse de montée en température: 4° C/minute

TABLEAU XVII

Hétérogénéité chimique des briques d'essais

(résultats en %)

	Brique A	Brique B	Brique C	Brique D
R ₂ O ₃	2,40 à 2,70	1,64 à 2,14	1,30 à 1,70	0,23 à 0,52
Al ₂ O ₃	0,35 à 0,79	0,23 à 0,70	0,10 à 0,53	0,00 à 0,27
Fe ₂ O ₃	0,46 à 0,67	0,38 à 0,67	0,29 à 0,36	0,17 à 0,27
TiO ₂	1,36 à 1,48	0,88 à 0,97	0,78 à 0,95	0,00 à 0,04
CaO	1,66 à 2,06	1,48 à 1,94	1,66 à 2,14	2,54 à 3,22
Na ₂ O + K ₂ O	0,13 à 0,16	0,16 à 0,22	0,08 à 0,16	0,14 à 0,21



CHAPITRE V

Méthode de mesure pour la détermination de l'épaisseur des briques

Par U. PLÖGER et D. SANNA

RÉSUMÉ

L'examen du comportement des briques dans les aciéries a porté sur les points suivants:

1° *Surveillance de la construction de la voûte*

Les différentes qualités de briques utilisées ont pu être maçonnées sans difficultés (avec ou sans mortier).

Un léger chanfrein sur l'une des arêtes de la brique facilite le montage de la voûte.

2° *Contrôle de la montée en température de la voûte*

3° *Mesure de la dilatation de la voûte au cours du chauffage*

Bien que dans la plupart des cas les différences de dilatation permanente n'aient pas soulevé de difficultés, il semble qu'on doive prévoir des joints appropriés, par exemple un joint de 0,75 % dans le cas des briques bien transformées et de 1,1 % pour les briques moyennement transformées.

4° *Mesure de l'évolution de l'usure des différentes bandes d'essai*

Un trou de faible diamètre est percé de bout en bout dans un certain nombre de briques (50 à 75 par voûte pour les fours belges et français, 25 à 32 par voûte pour les fours allemands et italiens). Ces briques sont réparties dans la voûte au moment de la construction. L'épaisseur est mesurée au moyen d'une barre enfoncée par l'extrados et dont on observe le dépassement de l'intrados.

5° *Relevé des températures à l'intrados de la voûte à l'aide du pyromètre Leeds et du pyromètre Tricolor*

- Vérification de l'homogénéité des températures de la voûte.
- Examen du comportement des quatre qualités étudiées au voisinage de la température du point de goutte.

6° *Mesure des températures à l'extrados au moyen du pyromètre Land et Ardonox*

Estimation des pertes calorifiques en fonction de cette température. Ces pertes sont les plus élevées dans les fours maçonnés à sec.

7° *Mesure des températures au cœur des briques à l'aide de couples Pt-PtRh insérés à différentes profondeurs avant le montage*

La conjugaison des mesures de températures à l'extrados, à l'intrados et au cœur des briques avec les mesures d'épaisseurs permet d'estimer l'évolution du coefficient de conductibilité thermique à l'intérieur de la brique en cours de campagne. Les imprégnations de la brique augmentent notablement ce coefficient de conductibilité thermique.

8° Photographies sur plaque sensible aux rayonnements infra-rouges

Ces photographies sont faites de préférence vers la fin de la campagne. Les parties les plus chaudes de l'extrados de la voûte correspondent aux épaisseurs les plus faibles. Il est possible, par une interprétation photométrique, de déterminer les épaisseurs relatives des briques et de présenter le relief de la voûte.

9° Photographies ordinaires de l'intrados de la voûte

Photographies faites lors de chaque série de mesures d'épaisseurs.

10° Prélèvements de briques usagées en fin de campagne

Programme et méthodes de mesures dans les aciéries

L'examen du comportement des briques dans les aciéries a porté sur les points suivants:

1 — Surveillance de la construction de la voûte

Les différentes qualités de briques utilisées ont pu être maçonnées sans difficultés (avec ou sans mortier).

Un léger chanfrein sur l'une des arêtes de la brique facilite le montage de la voûte.

2 — Contrôle de la montée en température de la voûte

En général, la courbe de montée en température adoptée a été celle habituellement en usage dans les aciéries. Les durées complètes de chauffage s'échelonnent de 56 à 110 heures dans les fours belges et français, de 90 à 130 heures dans les fours allemands et de 65 heures dans les fours italiens.

3 — Mesure de la dilatation de la voûte au cours du chauffage

On a mesuré la montée de la voûte en notant le déplacement par rapport à un repère fixe de tiges placées à la clé de chacune des différentes bandes d'essai. On a constaté (figure 15) que:

— la plus grande partie de la montée de la voûte (environ 100 mm) correspond à la dilatation de la cristobalite (vers 220° C au laboratoire);

— cette dilatation se produit lorsque la température de l'intrados est comprise entre 180 et 500° C;

— elle est pratiquement la même avec tous les types de briques essayés;

— la dilatation à haute température (1 400° C), due à la transformation du quartz des briques moyennement transformées, n'a pu être décelée de manière certaine au cours de la mise en chauffage;

— aucun incident ne s'est produit malgré la présence, dans une même voûte, de briques complètement et moyennement transformées;

— bien que, dans la plupart des cas, les différences de dilatation permanente n'aient pas soulevé de difficultés, il semble qu'on doive prévoir des joints appropriés, par exemple un joint de 0,75‰ dans le cas des briques bien transformées et de 1,1‰ pour les briques moyennement transformées.

4 — Mesure de l'évolution de l'usure des différentes bandes d'essai

a) Méthode

Un trou de 8 mm de diamètre est percé de bout en bout dans un certain nombre de briques qui sont réparties dans la voûte au moment de la construction. L'épaisseur est mesurée au moyen d'une barre enfoncée par l'extrados et dont on observe le dépassement à l'intrados. L'emploi d'un tube d'acier Ni-Cr refroidi par de l'air comprimé permet si besoin est, de faire les mesures en marche.

b) Fréquence des mesures

L'épaisseur de la voûte est mesurée de la sorte en 10 ou 15 points par bande, c'est-à-dire pour 50 ou 70 points par voûte dans le cas des fours belges et français, ou 5—6 points par bande, y compris les lignes habituelles, c'est-à-dire en 25—32 points par voûte pour les fours allemands et italiens; dans le premier cas, toutes les deux ou trois semaines; dans le second cas, toutes les semaines; dans le dernier (Italie), toutes les quatre semaines.

5 — Relevé des températures à l'intrados de la voûte

Ces mesures faites à l'aide du pyromètre Leeds ou du pyromètre Tricolor ont un double but:

— vérifier l'homogénéité des températures de la voûte et déceler éventuellement des différences de températures entre les diverses bandes;

— examiner le comportement des quatre qualités étudiées, spécialement au voisinage de la température du point de goutte. On a trouvé que les trois briques B, C et D avaient la même température de gouttage, supérieure de 30° C à celle de la brique A.

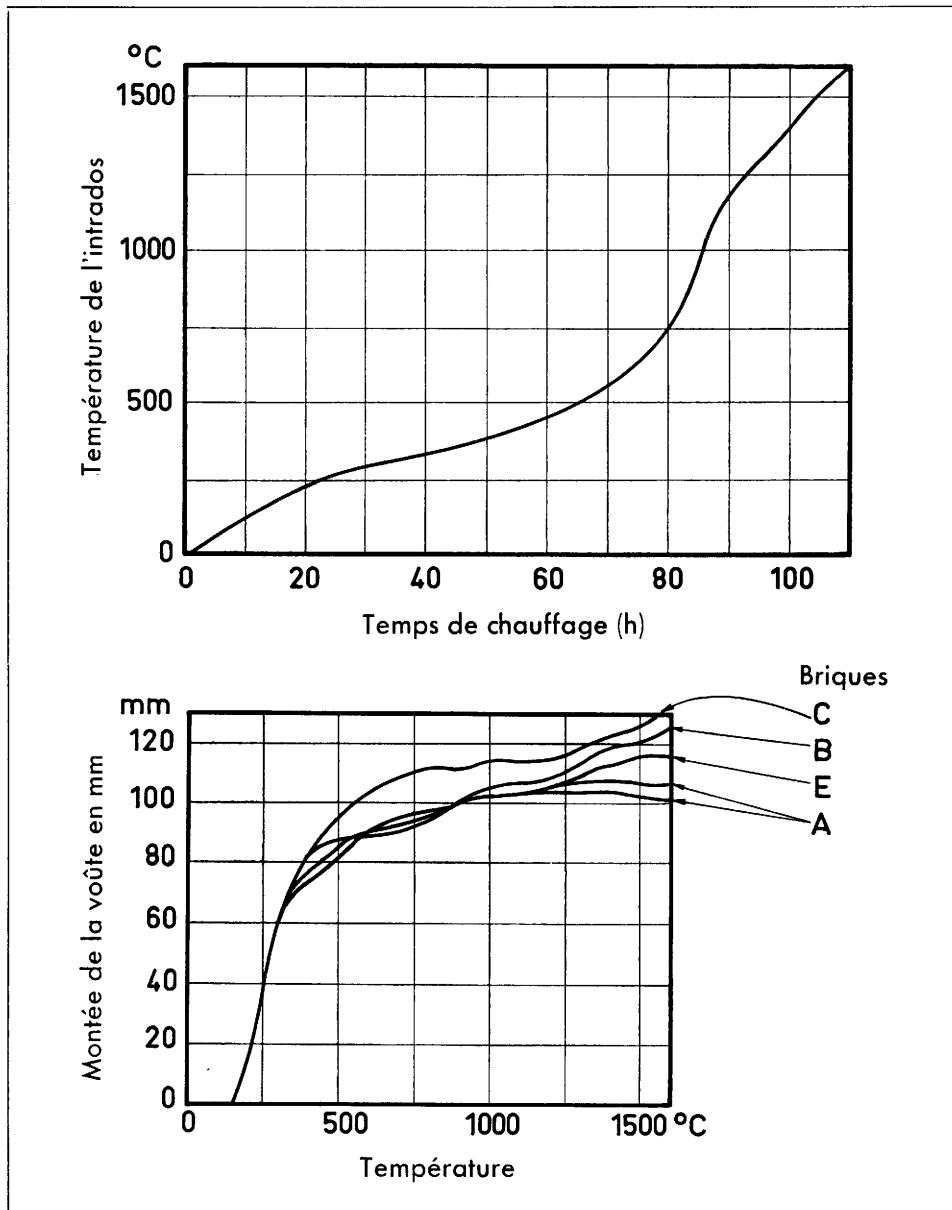


Fig. 15 — Mise en chauffage de la voûte du four. Montée de la voûte.

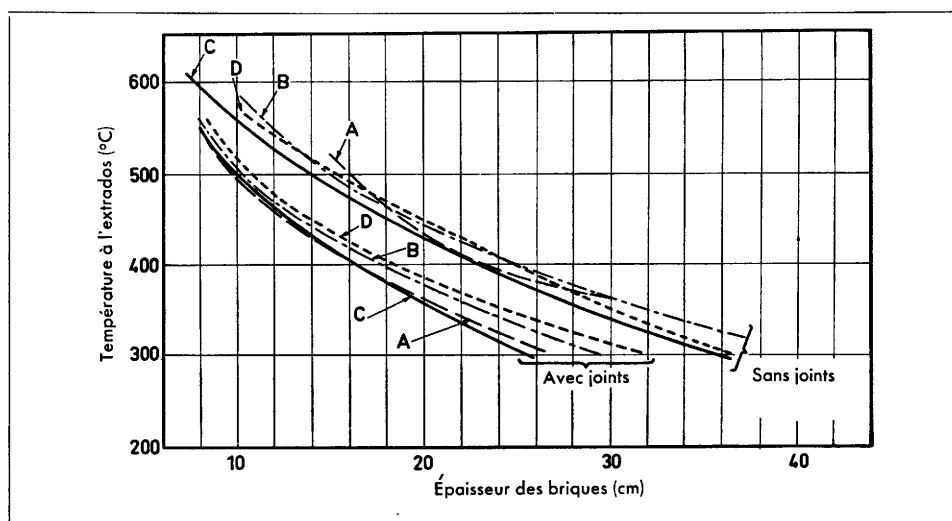


Fig. 16 — Relation entre la température à l'extrados et l'épaisseur de la voûte avec joint et sans joint.

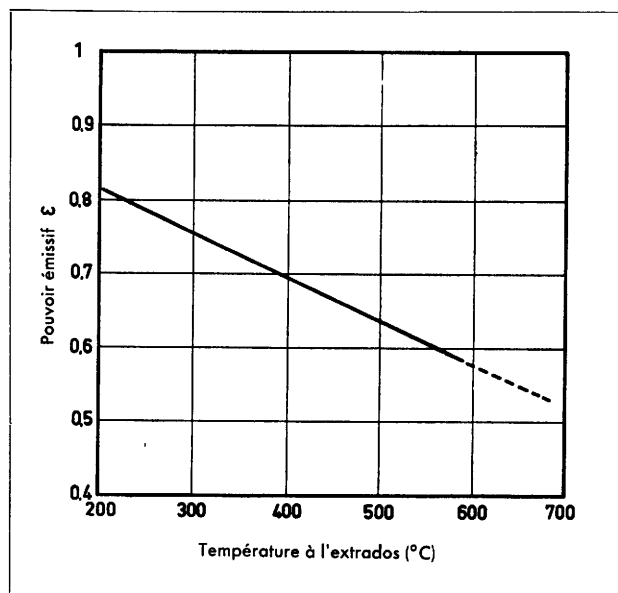


Fig. 17 — Relation entre la température à l'extrados et le pouvoir émissif des briques.

6 — Mesure des températures à l'extrados au moyen du pyromètre Land ou du pyromètre Ardonox

L'emploi de ces pyromètres permet de mesurer:

- la température réelle à l'extrados,
- le pouvoir émissif de l'extrados,
- la température d'émission.

qualités examinées ne paraissent pas montrer de différence à cet égard. L'application des formules de la convection naturelle et du rayonnement permet, connaissant la température à l'extrados et le pouvoir émissif, de calculer les pertes calorifiques à l'ambiance (figure 18) en fonction de la température à l'extrados. Ces pertes sont les plus faibles pour les voûtes maçonnées avec du ciment.

Connaissant l'épaisseur de la voûte, il est aisé d'en déduire la valeur du coefficient moyen de conductibilité thermique en régime permanent: à titre indicatif, ce coefficient est voisin de 2 kcal/m/h/°C (légèrement inférieur pour la brique C, légèrement supérieur pour la brique B). La figure 19 donne pour chaque qualité de ligne neuve la relation entre le coefficient de conductibilité thermique et la température. Il était nécessaire de connaître la manière utilisée pour faire les joints des briques, pour interpréter les différences constatées par rapport aux prévisions.

Comme, en cours de campagne, les propriétés physiques et chimiques des briques s'éloignent de celles à l'état neuf, il paraît indiqué d'étudier comment varie ce coefficient au cœur de la brique en fonction des différentes zones.

7 — Mesure des températures au cœur des briques

On a mesuré et enregistré la température au cœur d'une brique B et d'une brique C au moyen de trois

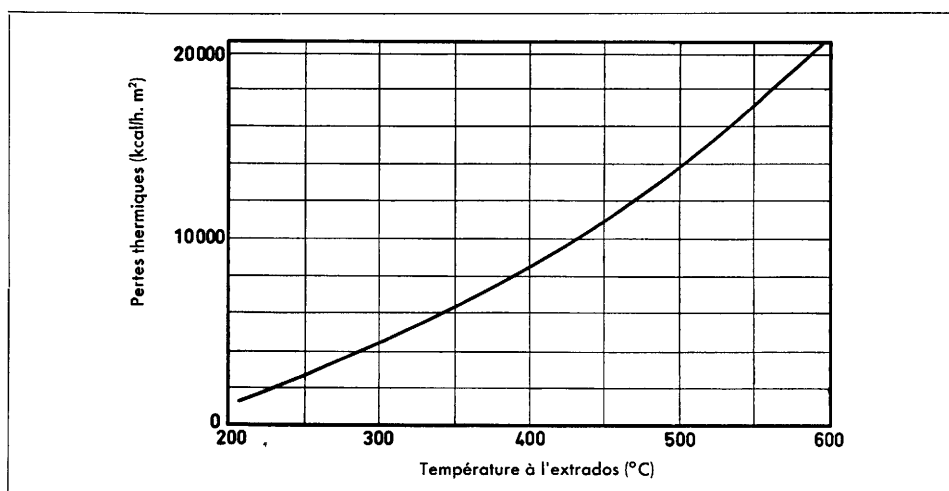


Fig. 18 — Relation entre la température à l'extrados et les pertes thermiques.

Il existe des corrélations, entachées d'ailleurs d'une dispersion notable, entre la température à l'extrados, d'une part, le pouvoir émissif et l'épaisseur de la voûte, d'autre part.

La figure 16 montre les relations moyennes entre la température à l'extrados et l'épaisseur de la voûte pour chacune des quatre briques étudiées. Il apparaît une nette différence entre les voûtes maçonnées avec mortier et les voûtes montées sans mortier. Cette différence se traduit exclusivement par une translation des courbes dont la direction demeure la même.

La figure 17 illustre la relation entre la température à l'extrados et le pouvoir émissif: les quatre

couples Pt-PtRh, placés à intervalles équidistants de l'intrados vers l'extrados.

Emplacement des couples Pt-PtRh

Il est illustré par la figure 20. La brique, d'une épaisseur de 300 mm, est partagée en quatre parties égales, de 75 mm chacune, au moyen des trois couples. Ceux-ci descendent au voisinage du joint et sont placés ensuite horizontalement, de manière à ce que l'écoulement du flux de chaleur dans la brique ne soit pas perturbé par la présence des couples et des trous que leur montage a nécessité.

Les températures mesurées de la sorte présentent donc une certaine garantie (figure 21).

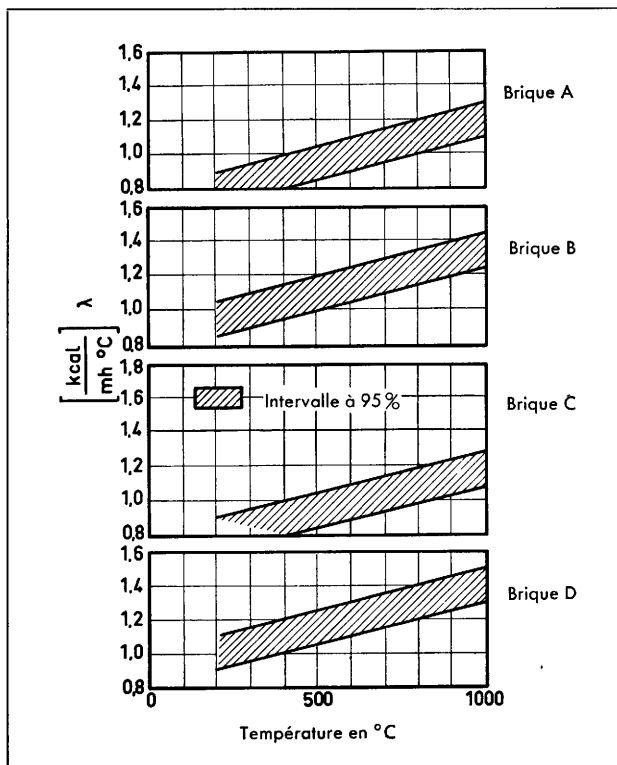


Fig. 19 — Coefficient de conductibilité thermique des briques de silice neuves.

Aspect de la brique usagée

En fin de campagne, la brique B, dans laquelle étaient placés ces couples, présentait l'aspect schématique représenté par la figure 22. La température limite de migration des fondants a été calculée par interpolation à partir des indications fournies par les couples 2 et 3: on a trouvé environ 1 160°.

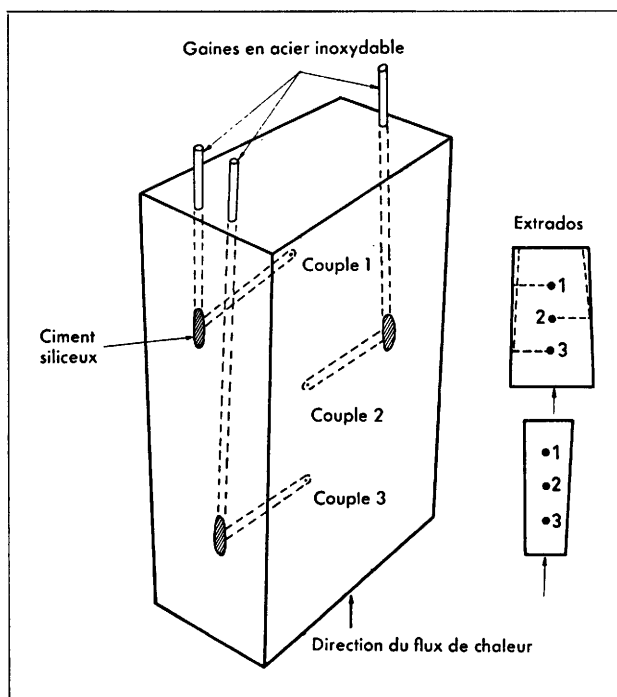


Fig. 20 — Montage des couples au cœur des briques.

Valeur des coefficients de conductibilité thermique à l'intérieur de la brique

Connaissant la température à l'extrados, c'est-à-dire de flux de chaleur, on les calcule aisément. Par exemple, pour la brique B:

- zone grise (cristobalitique) env. 1,7 kcal/m/h/°C
- zone noire et brune (tridymite et fondants) env. 3,0 kcal/m/h/°C
- zone inaltérée env. 1,6 kcal/m/h/°C

Ces valeurs sont légèrement plus faibles pour la brique C.

Évolution de ces coefficients au cours des campagnes

Nous avons examiné comment évoluaient ces coefficients au cours des campagnes pour chacune des quatre parties de la brique délimitées par les couples de l'extrados vers l'intrados (tableau XVIII).

L'examen des résultats trouvés pour la brique B montre que:

- le coefficient de conductibilité thermique de la zone I (inaltérée) varie peu au cours de la campagne;
- celui de la zone II ne varie pas jusqu'à la 123^e coulée, puis augmente lorsque les fondants atteignent cette zone;
- le coefficient de conductibilité thermique de la zone III croît constamment par suite de la migration des fondants et des infiltrations d'oxydes métalliques;
- en raison du même phénomène, le coefficient de conductibilité thermique de la zone IV croît d'abord, puis diminue quand, la brique s'étant usée, la zone IV, de dimensions plus restreintes, est entièrement occupée par la zone grise.

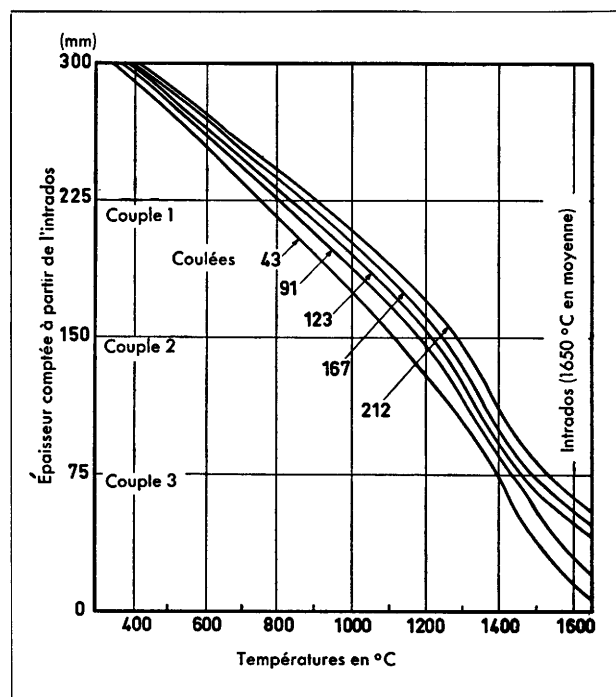


Fig. 21 — Mesure des températures au cœur de la brique B. Extrados (température mesurée au pyromètre Land).

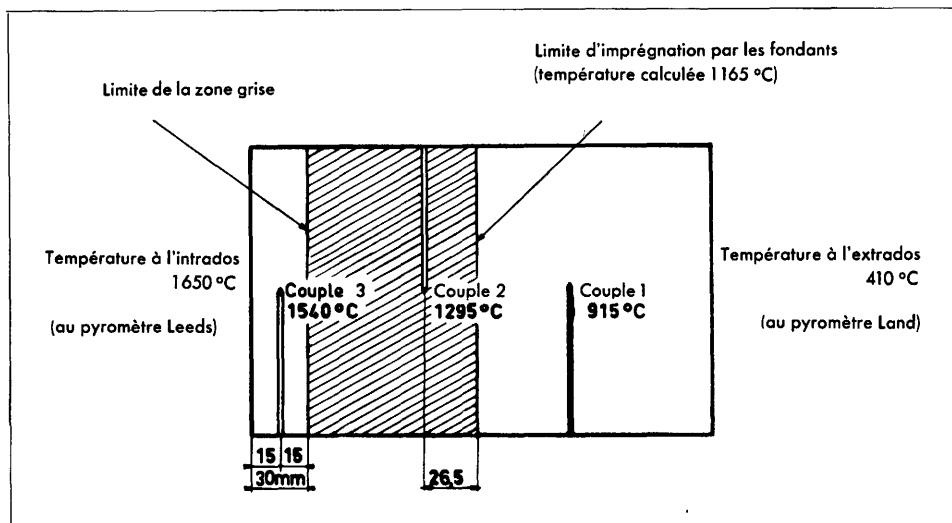


Fig. 22 — Section schématique d'une brique B usagée.

Des résultats analogues ont été trouvés pour la brique C:

— le coefficient de conductibilité thermique de la zone I (inaltérée) varie peu et vaut en moyenne 1,35 kcal/m/h/°C;

— le coefficient de conductibilité thermique de la zone II croît de 1,4 à 1,8 kcal/m/h/°C;

— dans la zone III, il s'élève de 1,7 à 3,25 kcal/m/h/°C;

— dans la zone IV, il croît d'abord, puis décroît comme pour la brique B.

Il convient de dire que ces indications ont seulement une valeur relative.

Il sera intéressant de relier ces coefficients aux caractéristiques trouvées au laboratoire (porosité, infiltrations, etc.).

8 — Photographies sur plaque sensible au rayonnement infra-rouge

Il s'agit ici de rendre visible le rayonnement de la voûte émis sur la longueur d'onde $830 \text{ m}\mu$. Cette longueur d'onde était donnée par l'emploi d'une plaque sensible au rayonnement infra-rouge, qui présente alors son maximum de sensibilisation. On s'est servi pour les clichés de l'objectif Plaubel-Anticomar, $f = 10 \text{ cm}$, $1:2,9$. Des temps de pose suffisamment longs (normalement 10, 100 et 1000 secondes) permettaient d'explorer toute la gamme de températures de la voûte. Les régions où s'est produite une usure plus importante avaient un rayonnement plus intense du fait de leur température plus élevée, d'où il résultait un noircissement plus prononcé de la plaque sensible à l'infra-rouge. La limite inférieure de température à laquelle apparaît un noircissement encore contrôlable se situe cependant à 380° . C'est pour cette raison que les clichés sur plaques sensibles au

TABLEAU XVIII

Évolution du coefficient de conductibilité thermique pendant la campagne du four

	Extrados	Couple 1		Couple 2		Couple 3		Intrados
		Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV			
(en kcal/mh °C)								
	N° de coulée \ Zone	I	II	III	IV			
Brique B	43	1,53	1,74	2,21	2,30			
	91	1,57	1,86	2,76	2,45			
	123	1,60	1,87	3,06	1,67			
	167	1,62	2,10	3,12	1,85			
	213	1,65	2,12	3,73	1,45			
Brique C	43	1,32	1,56	1,88	2,04			
	91	1,35	1,54	2,31	2,56			
	123	1,42	1,64	2,62	2,06			
	167	1,47	1,65	2,49	1,30			
	213	1,46	1,80	3,27	1,10			

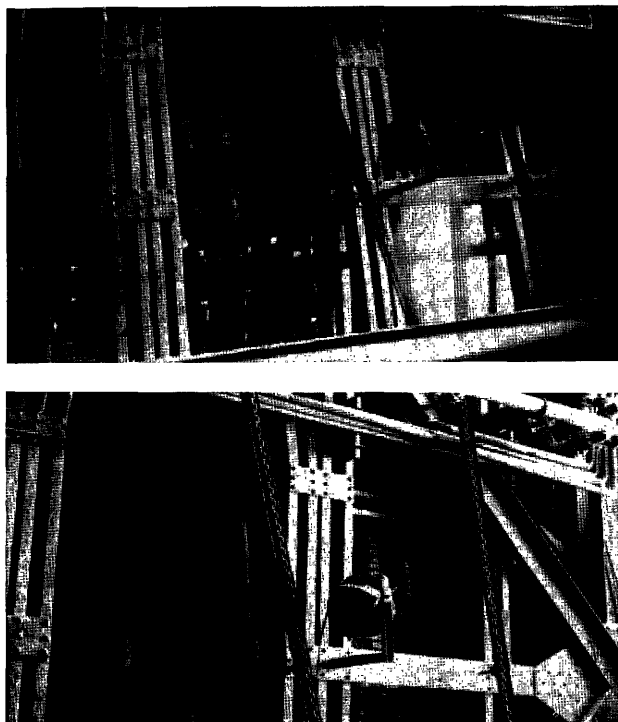


Fig. 23 — Photographie prise à l'infra-rouge et photographie normale comparative d'un point défectueux de la voûte.

rayonnement infra-rouge ont généralement été pris vers la fin de la campagne des fours. Les plaques donnaient ainsi, à ce moment, des renseignements sur l'usure relative des briques.

On a comparé sur la figure 23 une photographie ordinaire de la voûte avec une autre prise sur plaque sensible au rayonnement infra-rouge. Il apparaît nettement sur ce dernier une zone où l'usure est beaucoup plus accentuée.

La figure 24, qui a été prise sur une plaque sensible au rayonnement infra-rouge pour trois temps de pose différents, fait en outre apparaître l'influence du temps de pose dans ce procédé. Cette figure montre également très nettement l'élargissement par zones du noircissement lorsqu'on passe d'un temps de pose au suivant.

Alors que le procédé qui a été décrit donne déjà des indications sur l'usure relative des briques par une simple lecture de l'enregistrement, une interprétation photométrique permet en outre d'avoir de meilleurs renseignements quantitatifs. Il est recommandé pour cela de subdiviser la plaque infra-rouge à l'aide d'un réseau, de telle façon que les lignes de celui-ci puissent être mesurées par un photomètre enregistreur. On obtient de cette façon un très bon profil de température de l'ensemble de

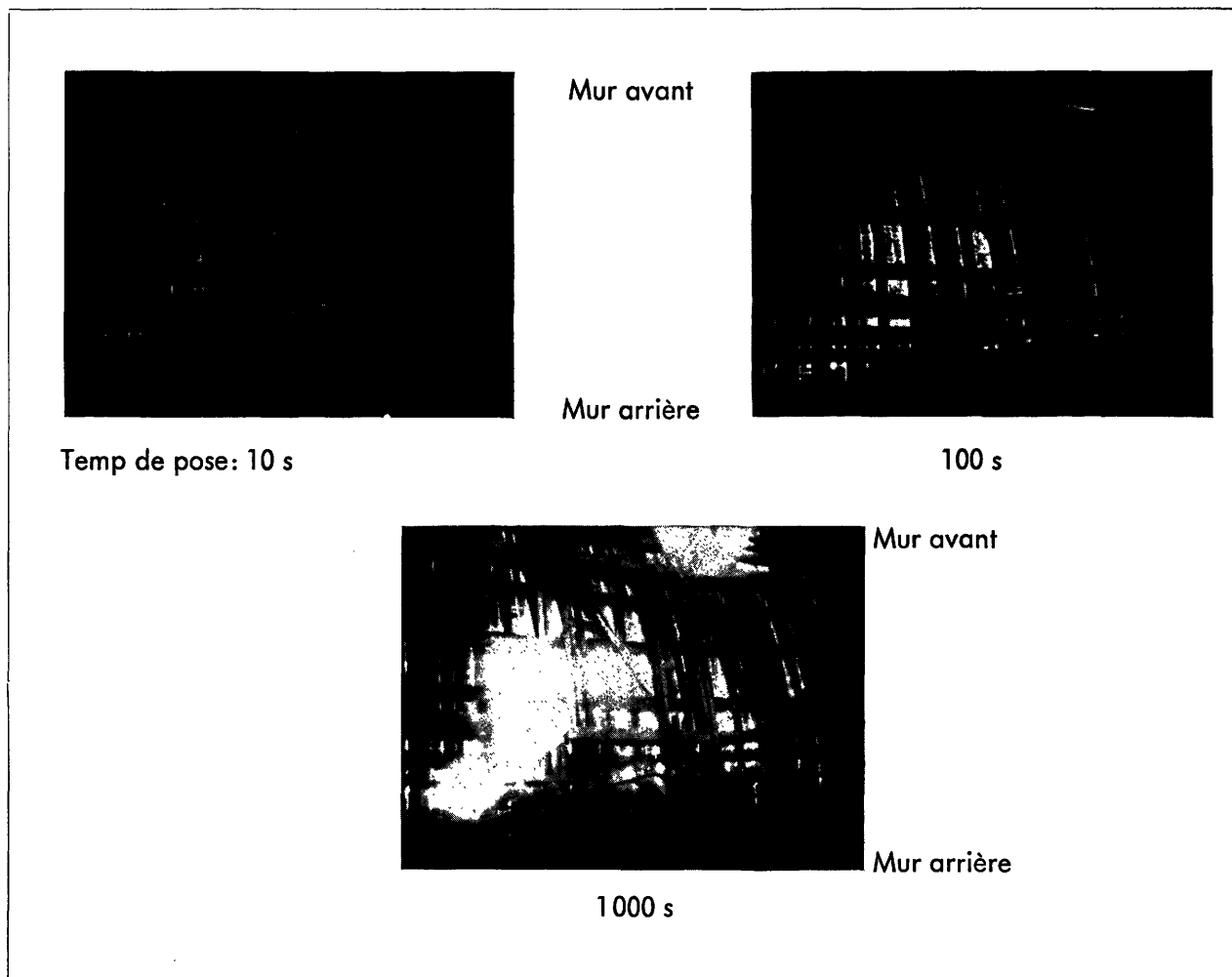


Fig. 24 — Photographies d'une voûte ayant fait 112 coulées, prises à l'infra-rouge avec différents temps de pose.

la voûte. On doit cependant encore tenir compte de certaines influences conditionnées par la qualité des produits d'enregistrement utilisés (1).

La figure 25 montre comment il faut effectuer la subdivision par un réseau, dans le cas du cliché à l'infra-rouge ordinaire, d'un extradados fortement usé dans sa partie centrale. La largeur de la voûte a été subdivisée en onze parties égales par un réseau de lignes, de sorte que les courbes photométriques obtenues par la suite donnent une image vraiment fidèle de la température extérieure de la voûte (fig. 26). Mais pour l'interprétation, il faut toujours utiliser simultanément les clichés à l'infra-rouge et les courbes photométriques. C'est ainsi que la figure 25 montre sur le cliché infra-rouge différentes ombres, dues à l'armature de la voûte ainsi qu'à un ventilateur. Or, ceci n'est pas très visible sur les courbes photométriques de la figure 26. Compte tenu de la formation d'ombres, la figure 26 donne une image fidèle du profil de température de l'extrados de la voûte. Compte tenu des relations entre la température extérieure de la voûte et l'usure représentées sur la figure 16, ce profil peut être également considéré comme le profil d'usure. La précision de ce procédé peut encore être augmentée en

utilisant un réseau plus étroit, ou même un réseau transversal.

9 — Photographies ordinaires de l'intrados de la voûte

L'état de la voûte a été matérialisé en cours de campagne à l'aide de photographies prises lors de chaque série de mesures d'épaisseurs. Les photographies en couleurs (hors-texte ci-après) qui suivent montrent les contrastes frappants qui apparaissent d'une bande à l'autre lorsque des briques de qualité très différente se trouvent employées côte à côte. Au contraire, on ne voit pas de différence lorsque les briques sont de qualité équivalente.

10 — Prélèvements de briques usagées en fin de campagne

Au moment de la mise en chauffage du four, des briques de chacune des qualités ont été repérées au crayon chimique, au mur arrière, à la clé et au mur avant de chacune des bandes d'essai; ces briques ont été récupérées à la démolition de la voûte en vue de les soumettre à des examens de laboratoire ultérieurs.

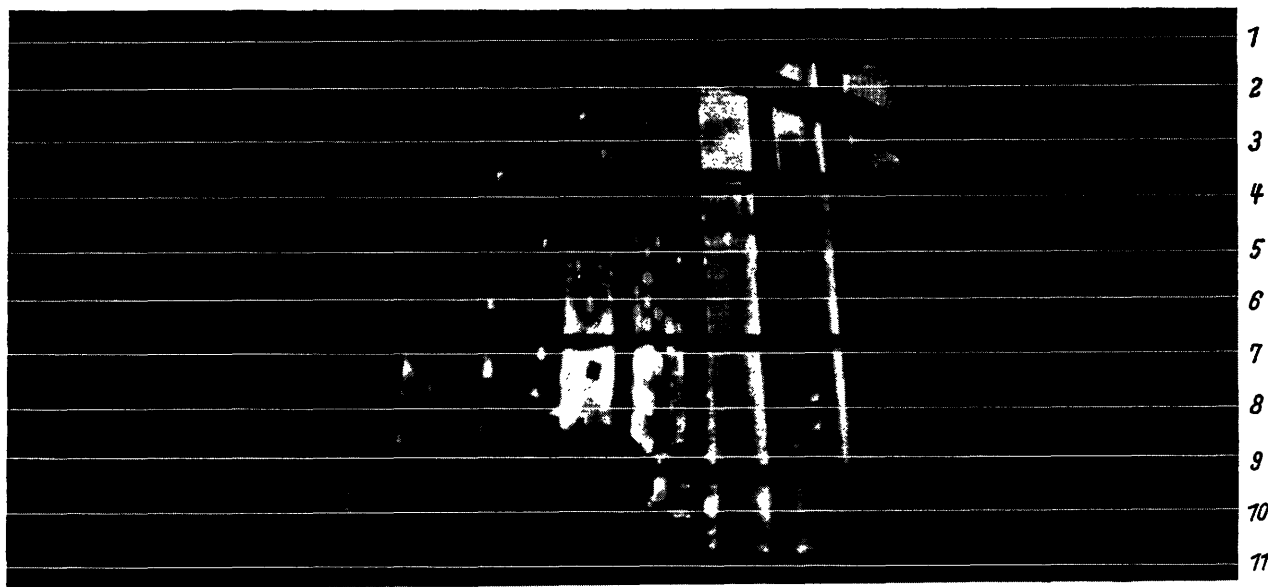


Fig. 25 — Photographie prise à l'infra-rouge d'une voûte d'essai, partagée par un réseau de 11 lignes.

(1) U. Plöger: Méthodes de mesure de températures pour la détermination de l'usure des briques de silice des voûtes de fours Martin, «Archiv für das Eisenhüttenwesen», à paraître.

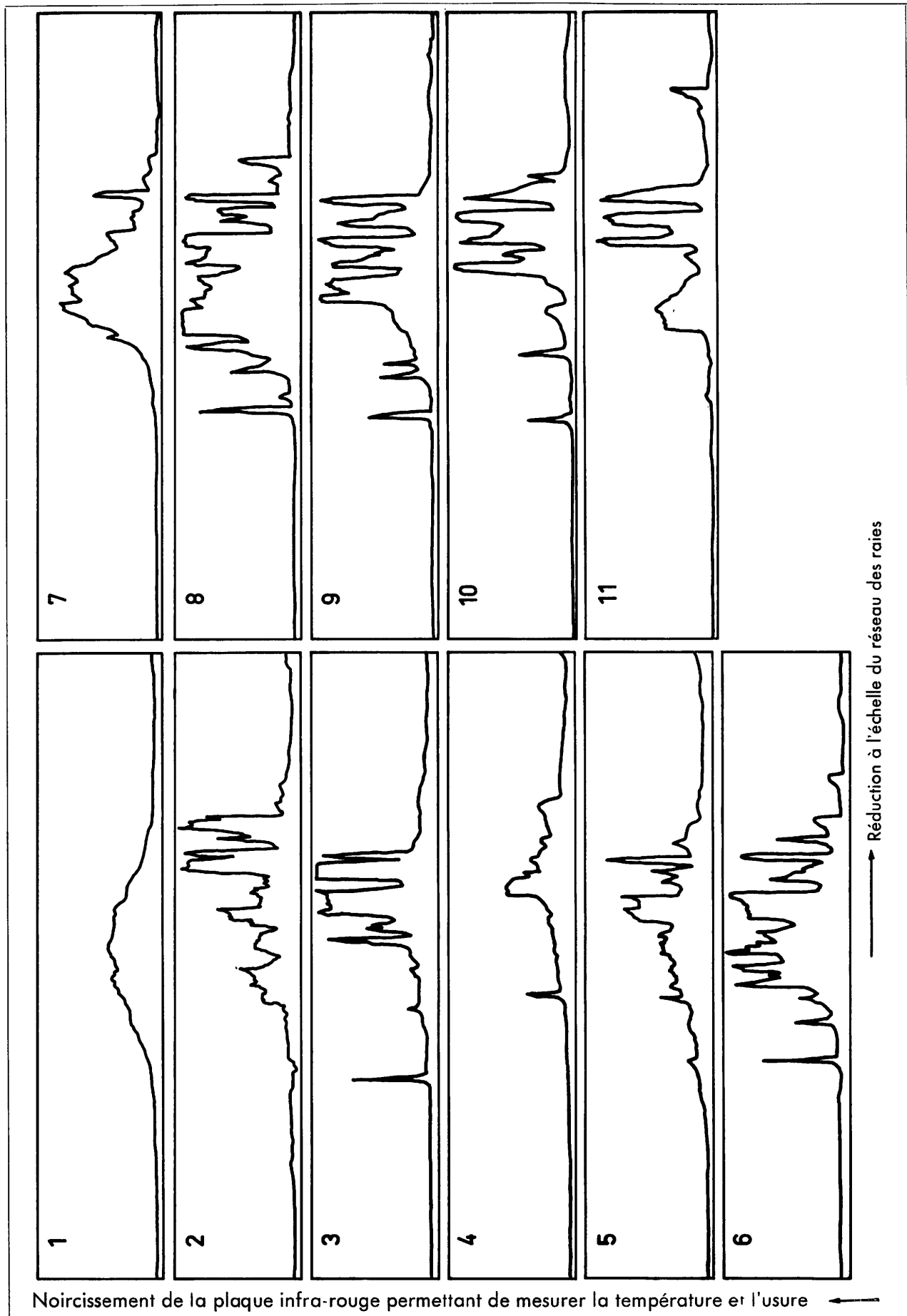
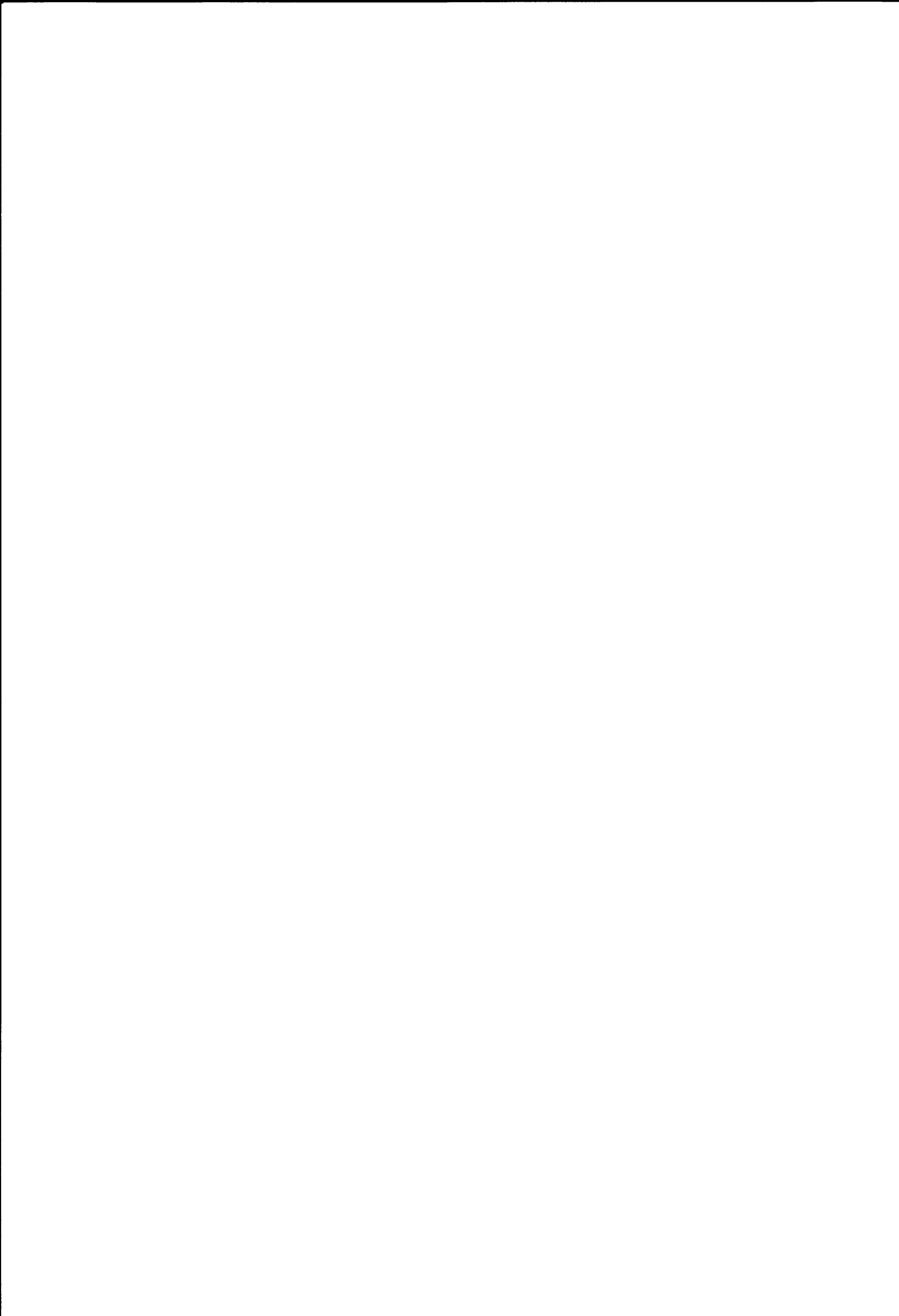


Fig. 26 — Cliché à l'infrarouge obtenu par photométrie d'après la fig. 25.



CHAPITRE VI

Comportement des briques dans les voûtes de fours

Par U. PLÖGER et D. SANNA

RÉSUMÉ

D'une manière générale, la conduite des 13 fours d'essai a permis de dégager les observations suivantes:

a) Il n'y a pas de relation entre la production spécifique du four et la température maximum de la voûte;

b) Le point de la voûte où la température est maximum se déplace au cours de la campagne du four;

c) Des formations locales de tourbillons dans la flamme conduisent souvent à des usures préférentielles;

d) Le refroidissement par ventilateurs a une grande influence sur le gradient de température dans l'épaisseur de la voûte, ainsi que sur l'usure et la tenue des briques;

e) Une plus forte conductivité thermique est souhaitable lorsqu'on a prévu de refroidir la voûte à l'aide de ventilateurs. On obtient ainsi par ce refroidissement un plus fort gradient de température dans l'épaisseur de la brique, ce qui est favorable surtout au cours de la seconde partie de la campagne.

Le comportement des briques étudiées dans les différentes voûtes d'essais est caractérisé de manière succincte dans le tableau XIX.

D'après l'opinion subjective des aciéristes, les briques B, C et D semblent de qualité équivalente, alors que la brique A est inférieure et présente une température de gouttage plus basse de 30° C que celle des trois autres briques.

Voici quelques indications supplémentaires concernant le déroulement des essais dans chaque four.

Four 1 (60 t)

Disposition des bandes d'essai de gauche à droite:
B — A — B — D.

Briques habituelles (au milieu): J.

Mode de chauffage: gaz naturel et mazout.

Les trois briques d'essai ont présenté le comportement suivant:

Au début de la campagne du four, il est apparu un «coulage» plus important dans la bande des

briques A et dans la bande des briques habituelles. Ce «coulage» présentait un aspect différent très frappant: dans les bandes précitées, il apparaissait sous forme de longs fils, tandis que pour les bandes B et D on n'observait qu'un «gouttage».

Les bandes B et D présentaient un comportement à peu près équivalent, tandis que la bande A était nettement plus mauvaise et que la bande des briques habituelles ne donnait également pas de résultats très satisfaisants. Il semble cependant que cette

dernière ait souffert de «l'effet de voisinage» de la bande A, parce que la campagne suivante, avec un garnissage constitué uniquement par des briques J, a donné des résultats bien meilleurs et a supporté 155 coulées au lieu de 85 lors de la campagne d'essai. Pendant toute la campagne, la voûte a été refroidie par des ventilateurs dont le nombre est passé de 3 à 7.

Four 2 (120 t)

Disposition des bandes d'essai de gauche à droite: C — D — C — A.

Briques habituelles (au milieu): H.

Mode de chauffage: gaz de four à coke + gaz de gazogène.

Formation de fils ou de gouttes: au début (après 16 coulées), on a constaté que la bande A présentait de longs fils.

Après 44 coulées seulement, deux ventilateurs ont été mis en action, puis deux autres après 64 coulées; ils étaient placés sur la partie arrière de la voûte, au centre et à droite.

Après 118 coulées, on a remplacé, en partant de la droite, 10 rouleaux dans les bandes A et C et dans la bande des briques habituelles H, ainsi que 2 rouleaux dans la bande D.

Après 152 coulées, on fit de même pour le reste de la voûte. Celle-ci a tenu pendant 232 coulées. La brique A était de loin la plus usée des quatre types de briques.

Peut-être y eut-il à gauche refroidissement par l'enfournement de fonte.

Four 3 (200 t)

Disposition des bandes d'essai de gauche à droite: D — C — D — B.

Briques habituelles (au milieu): H.

Mode de chauffage: gaz de gazogène avec 22% de mazout.

Après 69 coulées, refroidissement complémentaire de la voûte par ventilateurs munis de tubes refroidisseurs. Après 110 coulées, il a fallu remplacer une bande d'environ 2 600 mm de large le long du mur arrière.

On a généralement constaté dans cette usine une «poussée» plus ou moins accentuée des bandes d'essai; mais ce phénomène apparaît ici d'une façon générale, même pour les voûtes ordinaires. Le four avait une allure un peu plus chaude à gauche qu'à droite pendant les 14 premiers jours, ce qui s'est traduit par une plus forte usure de la bande D.

Lorsqu'on a remédié à cette irrégularité dans la marche du four, la diminution de l'épaisseur de la voûte s'est déplacée vers le milieu et la droite, ce qui correspondait à une usure normale; l'usure était d'ailleurs maximum au-dessus du trou de coulée. La voûte a supporté 197 coulées. L'usine donne l'ordre de qualité suivant: 1° — B; 2° — C; 3° — D. Ce résultat est probablement encore influencé par l'effet de la marche irrégulière du four au début de l'essai.

Four 4 (80 t)

Disposition des bandes d'essai de gauche à droite: A — B — A — C.

Briques habituelles (au milieu): H.

Mode de chauffage: essentiellement du gaz de gazogène + mazout, parfois un autre mode de chauffage (voir le tableau XIX.)

Après 98 coulées, les bandes A ont été refroidies au-dessus du mur arrière, d'abord par un ventilateur, puis, 14 jours plus tard, par deux ventilateurs, tandis qu'au même moment la bande C était refroidie par un seul ventilateur.

L'usure était plus grande au-dessus du mur arrière qu'aux autres endroits. Les bandes A se sont usées beaucoup plus rapidement que les bandes B et C, la bande C toutefois encore beaucoup plus vite que la bande B. Après 178 coulées, on a remplacé la moitié de la bande A de gauche, la totalité de la bande A de droite et la moitié de la bande C. La voûte a supporté 291 coulées. L'usine donne la classification suivante: 1° — B; 2° — C; 3° — A.

Les briques C semblent plus mauvaises que les briques B, parce que ces dernières n'ont nécessité aucune réparation au cours de la campagne d'essai du four et que, pour des campagnes de four normales (avec briques B), une réparation est généralement nécessaire après 230—280 coulées. Ceci montre que le four a été conduit plus prudemment.

Four 7 (100 t)

La voûte comportait les qualités suivantes: D — C — D — B.

La qualité habituelle était une brique F.

Le four était chauffé au gaz de gazogène.

Le comportement des trois briques d'essai s'y est avéré comparable et excellent: le four a fait 213 coulées sans aucune réparation. D'ailleurs, les briques d'essai étaient encore en bon état à la fin de la campagne, le four ayant dû être arrêté à cause du mauvais état des brûleurs.

La tenue de la brique F a été presque équivalente à celle des trois briques d'essai; on a noté cependant une usure un peu plus forte dans la bande centrale au mur avant, où les briques F avaient commencé à gonfler avec commencement de dislocation à cause de leur très faible degré de transformation. Ce gonflement ne s'est d'ailleurs produit qu'en fin de campagne aux environs de la 200^e coulée. Outre la qualité des briques, les très bons résultats obtenus paraissent avoir été influencés par plusieurs circonstances favorables:

— reconstruction du four à neuf avant démarrage;

— contrôle de la température à l'intrados de la voûte en deux points, près du mur arrière, ce qui a permis d'éviter les «coups de feu»;

— contrôle fréquent de la voûte par les fondeurs.

Four 8 (75 t) (Voir photographies en couleurs page 51)

La voûte comportait, de gauche à droite, les bandes suivantes: A — A — C — B.

La brique habituelle était une brique G.

Le combustible était du gaz de gazogène.

Dès les premières coulées, les briques A ont été usées très rapidement. Il semble d'ailleurs que cette usure ait été favorisée par une direction privilégiée de la flamme venant attaquer la voûte en cet endroit. Au four Maerz chauffé au gaz pauvre, la flamme s'épanouit fréquemment à la sortie des brûleurs en forme de «moustache», et c'est une branche de cette moustache qui, remontant le long du mur arrière, vint lécher et détériorer la voûte.

Après 40 coulées, les deux bandes de briques A étaient nettement plus usées que le reste de la voûte. La bande en briques G, au-dessus du trou de coulée, est également attaquée, mais moins fortement, alors que les deux bandes B et C demeurent intactes. Ainsi que le montrent les photographies, la coupure entre les zones est absolument franche, et ceci doit suffire à éliminer qualitativement l'influence de la direction de la flamme.

Après 173 coulées, 6 m² de briques A ont dû être remplacés, ainsi qu'un peu de briques G.

Au bout de 190 coulées, il fallut remplacer toutes les briques A et les briques G par des briques de l'usine, tandis que les briques B et C étaient en bon état; elles l'étaient encore au bout des 290 coulées lorsque le four fut arrêté pour être réparé.

Four 9 (60 t) (Voir photographies en couleurs page 49)

La répartition des bandes d'essai était la suivante:
D — D — C — B.

La brique habituelle était une brique H.

Le four était chauffé par un mélange de gaz mixte et de gaz de gazogène.

Les trois briques B, C et D paraissent avoir eu une tenue comparable. Ceci est confirmé par les constatations faites concernant le gouttage de ces trois qualités: les gouttes se forment vers 1 670 °C, tombent vers 1 680 °C; vers 1 690 °C, l'écoulement devient plus abondant, soit sous forme de gouttes courtes, soit de stalactites; enfin, au-delà de 1 700 °C, l'usure devient très rapide. En raison de la difficulté de ces mesures à l'intrados, les températures indiquées n'ont qu'un caractère relatif.

Pendant la première moitié de la campagne, la température à l'intrados de la voûte fut plus forte dans la partie droite: il en est résulté une usure un peu rapide des briques B à l'extrême droite de la bande, puis des briques C vers le mur arrière. Pendant la seconde partie de la campagne, le four se trouva équilibré thermiquement, mais la température fut la plus élevée dans la bande centrale en briques H. C'est là qu'il apparut nécessaire de faire la première réparation intermédiaire au mur arrière. Par la suite, d'autres réparations ont été effectuées toujours vers le mur arrière, sur les bandes D, H et C. La voûte a tenu 270 coulées.

Four 10 (50 t)

Les briques étaient réparties comme suit:
B — B — A — D.

La brique habituelle était une brique G.

Le four était chauffé au gaz mixte.

Malheureusement, la voûte a été endommagée, en début de campagne, par deux obus qui ont explosé à l'aplomb des bandes D et A. On a noté cependant que les briques A s'étaient usées plus rapidement que les briques voisines (D et G). On a néanmoins continué d'observer la partie gauche de la voûte où se trouvait la double bande B. Ces briques, ainsi que la bande centrale en G ont eu un très bon comportement. La voûte a tenu 312 coulées.

Four 11 (35 t)

Disposition des bandes d'essai de gauche à droite:
C — C — D — A.

Briques habituelles (au milieu): H.

Mode de chauffage: Gaz naturel (forte proportion de méthane) + 24% de mazout.

Disons tout de suite que ce four, durant sa campagne d'essai, a atteint le nombre de coulées le plus élevé de toutes les campagnes de fours d'essais de la C.E.C.A., à savoir 495 coulées. La voûte d'essai n'était constituée que par des briques de forme ordinaire, c'est-à-dire sans nervures, comme on le fait habituellement dans cette usine. Enfin, les mesures de températures effectuées avec le Tricolor à l'intrados de la voûte ont donné les températures les plus basses de toutes celles qui ont été mesurées dans toutes les campagnes des fours d'essais, à savoir une température maximum de 1 610 °C seulement. Pour ce four, la tenue moyenne de la voûte, avec les briques habituelles H, est de 400 coulées. Malgré cela, la production en t/h de ce four se trouve parmi celles des six meilleurs fours d'essai. Ceci ne peut s'expliquer que par la direction extrêmement bonne de la flamme. Les observations ont montré que la flamme est très bien appliquée sur le bain et qu'elle ne présente aucune remontée vers la voûte. En conséquence, le point de gouttage d'aucune des briques d'essai n'a été atteint, ce qui explique que l'on ait observé un bon comportement de la brique A, qui partout ailleurs s'usait prématurément.

Après la 370^e coulée, le mur avant a été refroidi en raison de l'apparition locale de taches rouges. Après la 420^e coulée, on a effectué une réparation au-dessus du mur avant sur 3 m de long et environ 1 m de haut, en partant de la bande du milieu, en face du trou de coulée. Cette réparation s'étendait à droite vers la bande D et de l'autre côté vers la bande C. Les mesures effectuées après la démolition ont donné les résultats suivants: l'usure était la plus faible pour les bandes d'essai voisines des brûleurs (à gauche C, à droite A). L'usure était à peu de chose près la même pour la bande C la plus proche du centre de la voûte, pour la bande centrale en briques habituelles H et pour la bande D située à droite de cette bande centrale; en aucun cas, l'usure ne dépassait 50% de l'épaisseur initiale des briques. La brique d'essai B n'a pas été utilisée dans cette voûte. Les trois briques d'essai utilisées se sont révélées à peu près équivalentes, la brique A n'étant pas plus mauvaise ici que les autres.

Four 12 (42 t)

Disposition des bandes d'essai de gauche à droite:
D — D — C — B.

Briques habituelles (au milieu): K.

Mode de chauffage: uniquement du mazout.

Les briques d'essai se sont comportées d'une façon à peu près équivalente. La formation de gouttes était très minime et l'on n'a pas effectué de mesures de la température du point de gouttage. Après la 230^e coulée, une petite réparation a été effectuée dans la bande K des briques habituelles, et une réparation encore moins importante dans les bandes D et C voisines de part et d'autre de la bande K. La voûte a tenu 284 coulées, soit 10% de plus que la moyenne normale de l'usine. On a constaté l'usure suivante pour les briques par mesures après démolition: 50% pour la brique habituelle K; 35—45% pour les briques D; jusqu'à 52% pour les briques C, et jusqu'à 36% pour les briques B.

Selon le chef de l'aciérie, les briques D étaient d'une qualité supérieure à celle des briques B et C.

Fours 14 (35 t) — 15 — 16 (60 t)

Trois voûtes d'essai ont été construites dans la même usine:

- a) une voûte A — A — B — C,
- b) une voûte D — C — D — B,
- c) une voûte A — B — A — C.

Dans les trois cas, la brique habituelle de l'usine était une brique E. Les deux dernières voûtes ont fait l'objet de deux campagnes successives sur le même four. Le combustible était du gaz de fours à coke avec addition d'huile.

Il fut constaté, là aussi, que les briques A étaient d'une qualité nettement inférieure aux trois autres briques d'essai. Dès les premières coulées, elles se sont usées rapidement et, dans les deux voûtes où elles se trouvaient essayées, il fallut les remplacer au bout d'une centaine de coulées par des briques E, afin de poursuivre les essais avec les autres qualités.

Des relevés faits à l'aide du pyromètre Leeds ont montré que le point de goutte des briques A était inférieur d'environ 30 ° C à celui des autres briques observées.

Une fois de plus, un effet, les briques B, C et D se sont avérées d'une qualité comparable. Par sa tenue, la brique E a été trouvée égale aux trois meilleures briques d'essai.

Les aciéristes de l'usine ont fait remarquer que, dans leur cas, le fait de monter des voûtes en briques de silice limite les possibilités de chauffage dans des proportions nettement plus importantes qu'avec des voûtes basiques. Cet inconvénient apparaît surtout lorsqu'il s'agit d'élaborer des aciers alliés, notamment pour la grosse forge, qui doivent être amenés à haute température soit en cours d'élaboration (aciers au chrome), soit au moment de couler (gros lingots de forge). Il est moins net dans le cas de la fabrication des aciers ordinaires.

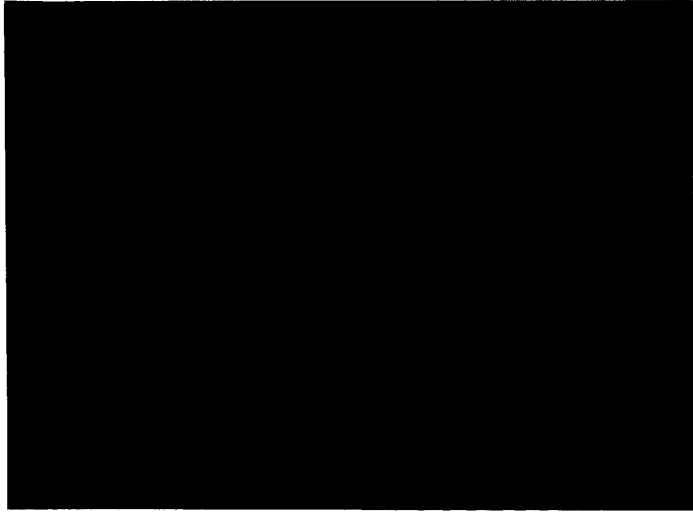


Photo A

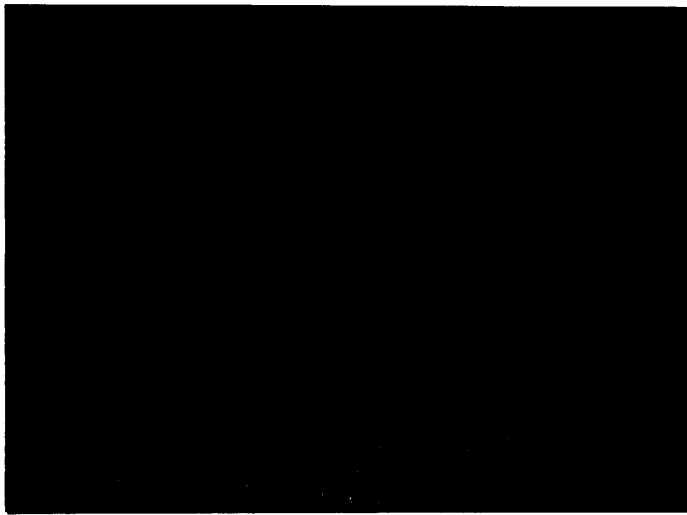


Photo B

Four 9

Photo A

La partie gauche de la voûte est en briques C et la partie droite en briques B. On ne voit pas de différence à la limite entre les deux bandes, et les deux briques paraissent de qualité équivalente. A l'extrême droite de la photographie, la flamme en frappant la voûte a provoqué une usure plus accentuée.

Photo B

Les 7 rouleaux qui apparaissent au milieu de la photographie et qui ont coulé légèrement sont en briques habituelles de l'usine; briques de bonne qualité. A leur gauche, sont des briques D et à leur droite des briques C qui présentent entre elles un aspect comparable: ces briques sont aussi de qualité équivalente.

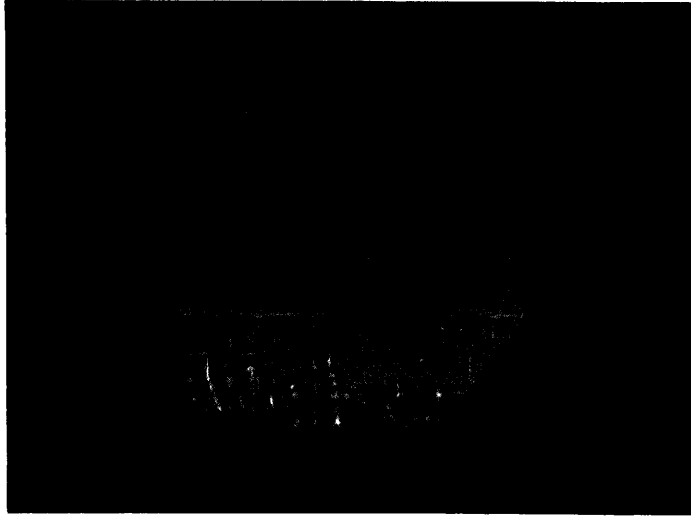


Photo C

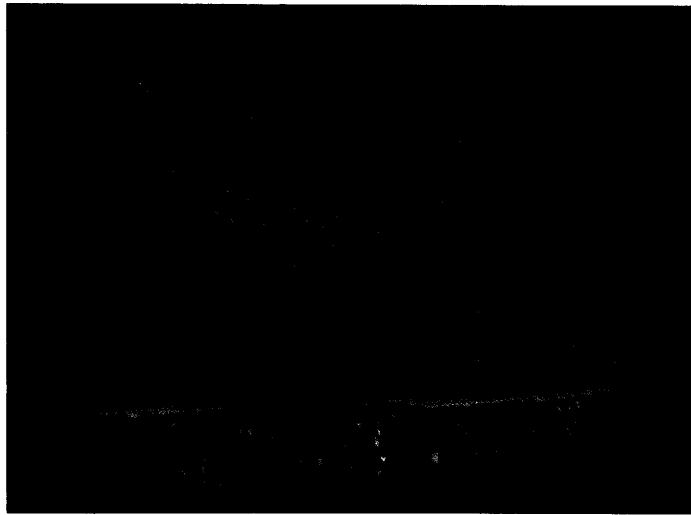


Photo D

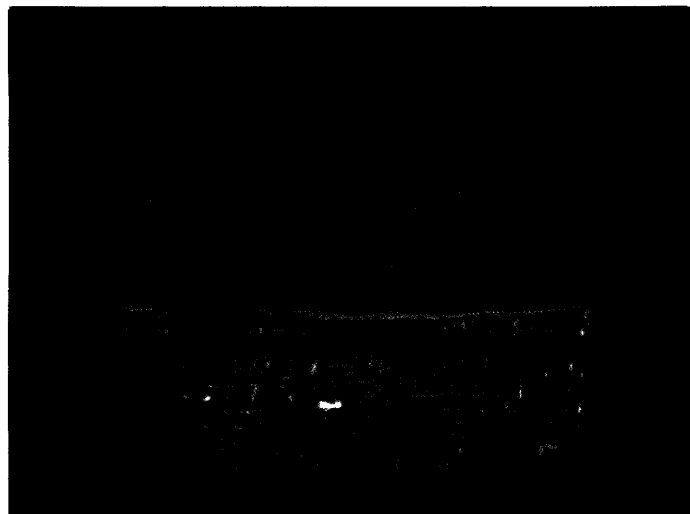


Photo E

Four 8

Photo C

Dans ce four on a utilisé des briques A. On voit sur cette photographie que le rouleau limite entre les briques A, à gauche, et les briques habituelles de l'usine, à droite, est très franchement marqué; il existe là un ressaut d'une quinzaine de centimètres de hauteur. La brique A paraît donc de qualité inférieure à la brique habituelle de l'usine.

Photo D

On reconnaît sur cette photographie, à gauche l'usure très forte subie par les briques et au milieu les briques habituelles de l'usine déjà observées sur la photo précédente. A droite sont des briques B qui ne présentent aucune altération. Cette photographie attire l'attention sur le pouvoir séparateur du four Martin qui, dans un intervalle de points de goutte relativement resserré (30°C), a néanmoins marqué la différence entre trois briques de qualité différente et dont les comportements ont été respectivement médiocre, moyen et bon.

Photo E

Il s'agit toujours de la même voûte d'usine. On retrouve dans la partie gauche de la photographie les briques habituelles de l'usine, qui ont légèrement coulé, dans la partie droite les briques B, et, à côté d'elles, les briques C. Elles ne présentent pas de différence dans leur aspect et sont bien, une fois de plus, de qualité équivalente.

TABLEAU XIX
Comportement résumé des briques

Four	Capacité nominale (t)	Combustible	Nombre de coulées	Répartition et comportement des briques			Remarques
				Gauche	Milieu brique habituelle	Droite	
1	60	Gaz naturel (70%) + mazout (30%)	85	B bon A mauvais	J moyen	B bon D bon	35% de charge liquide, aucune réparation. Soufflage sur la voûte depuis le commencement.
2	120	Gaz de fours à coke + gaz de gazogène	232	C moyen D moyen	H moyen	C moyen A mauvais	20% de charge liquide et 25% de duplex. Soufflage à partir de la 44 ^e coulée. Après 118 coulées, remplacement, à droite, de 10 rouleaux dans les bandes A, C et H, et, à gauche, de 2 rouleaux, dans la bande D. Après 152 coulées, remplacement du reste. Chargement de fonte liquide au mur arrière, à gauche.
3	200	Gaz de gazogène + mazout (22%)	197	D moyen C bon	H très bon	D moyen B très bon	Soufflage à partir de la 69 ^e coulée. Après 110 coulées, réparation au-dessus du mur arrière. Pendant les 14 premiers jours, le four a été plus chaud à gauche.
4	80	Gaz de gazogène + mazout	291	A mauvais B très bon	H bon	A mauvais C moyen	23% de charge liquide ou 70% de duplex. Usure plus forte au-dessus du mur arrière. Après 178 coulées, remplacement de la moitié de la bande A, à gauche, de toute la bande A, à droite, et de la moitié de la bande C.
7	100	Gaz de gazogène	213	D très bon C très bon	F bon	D très bon B très bon	Four équilibré thermiquement. Usure plus forte au milieu du mur avant.
8	75	Gaz de gazogène	290	A mauvais A mauvais	G moyen	B très bon C très bon	Marche du four plus forte à gauche. Briques A remplacées après 190 coulées.
9	60	Gaz mixte + gaz de gazogène	270	D très bon D très bon	H bon	C très bon B très bon	Marche du four plus forte à droite durant la première partie de la campagne. Usure plus importante au milieu du mur arrière.
10	50	Gaz mixte	312	B très bon B très bon	G très bon	A mauvais D ?	Four thermiquement équilibré. Partie droite du four (briques A et D) prématurément détruites par des explosions.
11	35	Gaz naturel (méthane) + mazout (24%)	495	C bon C moyen	H moyen	D bon A bon	Voûte sans nervures. Soufflage à partir de la 370 ^e coulée. Après 420 coulées, remplacement des bandes D, H et C sur une longueur de 3 m au-dessus du mur avant.
12	42	Uniquement mazout	284	D bon D très bon	K moyen	C moyen B bon	Affinage par l'oxygène à la lance (3,7 m ³ n/t.). Après la 230 ^e coulée, réparation des bandes C et D du mur avant sur 1,5 m, de part et d'autre de la bande K, et sur 0,3 à 0,7 m de profondeur.
14	35	Gaz de fours à coke	233	A mauvais A mauvais	E très bon	B très bon C très bon	Four équilibré thermiquement. Briques A remplacées après 119 coulées.
15	60	Gaz de fours à coke (8%) + huile (20%)	159	D très bon C très bon	E très bon	D très bon B très bon	Four équilibré thermiquement.
16	60	Gaz de fours à coke (60%) + huile (40%)	224	A mauvais B très bon	E très bon	A mauvais C très bon	Four équilibré thermiquement. Briques A remplacées après 76 coulées.



CHAPITRE VII

Étude statistique des résultats

Par F. BASTENAIRE et M. BASTIEN

RÉSUMÉ

L'étude des variations d'épaisseur des bandes d'essai ayant montré que l'usure est une fonction linéaire du nombre de coulées, la tenue de chaque qualité de brique a été caractérisée par la pente de cette fonction.

Les effets des différents facteurs agissant sur le taux d'usure ne pouvant être représentés par une fonction additive, mais plutôt par des facteurs multiplicatifs, on a analysé la variance des valeurs trouvées pour les logarithmes de ces taux.

Les résultats ont montré que la qualité de la brique et le four d'essai ont eu tous deux une influence significative sur l'usure des réfractaires.

Deux seulement des caractéristiques des fours qui peuvent être la cause de différences de tenue des voûtes étaient étudiées: le tonnage et le combustible de chauffage. L'effet du tonnage seul a été trouvé significatif.

1. — *Examen des données*

Les données de base sont constituées par un certain nombre de résultats de mesure de l'épaisseur des voûtes.

Des trous avaient été prévus à cet effet. Ils avaient été réalisés pratiquement, soit en utilisant quelques briques percées dans le sens de leur hauteur, soit en abattant les arêtes de quatre briques juxtaposées. L'épaisseur a été mesurée de diverses manières, par exemple en enfonçant un fil ou un tube d'acier dans les trous jusqu'à ce qu'on l'aperçoive à l'intrados.

On peut déjà observer, en comparant les dispersions des mesures des épaisseurs relevées dans des trous voisins les uns des autres et au même moment de la campagne d'un four, que celles-ci sont variables, ce qui montre que les diverses méthodes de mesure utilisées n'eurent pas la même précision.

Ce qui importe bien davantage, du point de vue de la facilité de l'exploitation des résultats et de la richesse des renseignements qu'on aurait pu en tirer, c'est que les trous furent répartis dans les voûtes selon des pointés très différents et que leur nombre fut variable, même parfois dans une même voûte, d'une bande à l'autre.

Le nombre des relevés d'épaisseur fut, lui aussi, variable.

Enfin, l'interprétation fut encore compliquée par l'absence de mesures d'épaisseurs, dans plusieurs essais, pour des raisons techniques diverses.

Le tableau XX donne, pour chaque four, le nombre de trous par bande dans chacune des trois régions: mur arrière, clé, mur avant. Il permet d'apprécier la diversité du nombre et de la disposition des trous percés dans les bandes.

Le nombre total des mesures effectuées au cours de la campagne dans chacune des trois régions des quatre bandes d'essai (numérotées I, II, III, IV de gauche à droite) est donné dans le tableau XXI. On peut constater que ce nombre est extrêmement variable et parfois très faible.

2. — *Réduction des données*

On a pu se rendre compte que le plan des essais avait été conçu en admettant que l'usure de chaque bande pourrait être caractérisée par une grandeur unique.

L'usure varie, en réalité, en fonction du temps, et les épaisseurs, mesurées en plusieurs points d'une même bande, peuvent être très différentes.

Il a été admis que les deux principaux facteurs agissant de façon systématique sur l'épaisseur de chaque bande étaient, d'une part, le nombre de coulées produites jusqu'à l'époque de la mesure et, d'autre part, dans une bande de position déterminée, la distance du point de mesure au plus grand axe du four. En accord avec l'expérience des aciéristes, les résultats montrent, en effet, que l'usure est généralement plus prononcée dans deux zones situées

clé. Dans la zone ainsi délimitée, on peut admettre que l'usure ne varie que de façon aléatoire en fonction de la position du point de mesure.

L'épaisseur est, par ailleurs, fonction du temps. Chacun des relevés couvrant toute la voûte, on pourrait se passer de définir une échelle des temps si l'on n'avait à comparer que l'usure de bandes appartenant à une même voûte. Mais, d'une part, l'expérience consistait, ce qui était beaucoup plus réaliste d'ailleurs, à comparer les briques entre elles dans différents fours, et, d'autre part, le plan permettait d'étudier l'effet de certaines caractéristiques des

TABLEAU XX

Four n°	Nombre de trous par bande			Four n°	Nombre de trous par bande		
	Arrière	Clé	Avant		Arrière	Clé	Avant
1	1	2	1	9	4	5	4
2	1	2	1	10	3	6	3
3	1 à 2	1 à 3	0 à 2	11	2	2 à 3	1
4	1	2	1	12	2	1	1
7	4	6	4	14	2	6	2
8	4	6 à 7	4	15	3	9	3
				16	3	9	3

TABLEAU XXI

Four n°	Bandes d'essais											
	I			II			III			IV		
	Ar.	Clé	Av.	Ar.	Clé	Av.	Ar.	Clé	Av.	Ar.	Clé	Av.
1	6	12	6	5	11	6	6	12	6	6	12	6
2	8	16	8	6	7	5	6	11	5	6	12	6
3	12	17	10	12	12	0	12	17	5	6	6	5
4	4	12	1	6	10	7	3	8	4	2	10	7
7	19	27	19	18	25	18	19	24	19	13	26	20
8	9	16	9	10	12	9	15	21	13	12	27	14
9	13	24	17	14	22	13	16	20	15	19	14	15
10	12	22	10	12	24	12	0	0	12	8	13	12
11	8	8	4	8	12	4	8	12	4	8	12	14
12	10	4	3	10	4	3	9	4	2	4	1	2
14	8	20	7	5	23	8	5	30	10	8	30	10
15	5	14	6	4	17	16	6	17	6	6	18	6
16	5	17	6	8	24	8	6	18	6	8	24	8

au voisinage des murs avant et arrière. Ils montrent aussi que la largeur des zones fortement usées est relativement faible, si bien qu'on peut désigner par «clé» une zone occupant une grande partie de la largeur du four.

Avant l'exécution des essais, nous avons envisagé d'étudier séparément le comportement des briques dans ces trois régions, mais le nombre des mesures relatives aux zones avant et arrière s'étant révélé, *a posteriori*, trop faible et surtout trop irrégulier pour permettre un dépouillement statistique, nous ne nous occuperons seulement que des résultats obtenus dans ce que nous avons considéré comme la

fours sur l'usure. Dans ces conditions, il fallait définir une correspondance des temps. L'unité commune que nous avons retenue est la coulée.

a) Variation de l'épaisseur en fonction du nombre de coulées

La variation de l'usure en fonction du nombre de coulées ne peut pas être suivie en chaque point de la voûte, à cause des données manquantes. La dispersion de chaque mesure serait d'ailleurs trop importante pour qu'il soit possible d'être bien renseigné sur la forme de la courbe représentative; mais, dans les voûtes où le nombre de trous est, dans

chaque bande, assez élevé, on peut délimiter des domaines à l'intérieur desquels l'usure ne semble pas varier de manière systématique et, par conséquent, diminuer la dispersion des résultats en calculant l'usure moyenne, en général, avec quatre à six points.

Par cette méthode, on a tracé soixante-cinq diagrammes «usure, nombre de coulées» et étudié le comportement des quatre réfractaires dans les trois régions et dans différents fours (il y aurait eu $32 \times 3 = 96$ diagrammes si tous les cas avaient pu être étudiés). On a trouvé qu'à l'exception de quatre ou cinq cas douteux, les points ne s'écartent que de façon aléatoire d'une droite passant par l'origine.

On a donc admis que cette forme de variation était générale et s'appliquait également aux cas où elle ne pouvait être directement vérifiée, vu le nombre et la dispersion des mesures.

La pente de la droite, exprimée par exemple en millimètres par 10 coulées, définit naturellement la résistance à l'usure du réfractaire, dans les conditions d'essai où il s'est trouvé placé. Elle peut être

l'ensemble de résultats de mesures faites à des instants donnés de la campagne.

On peut admettre que chacun de ces résultats, pris séparément, suit une loi de Laplace-Gauss; mais, logiquement, l'usure paraissant être un phénomène irréversible, ils ne devraient pas être indépendants en probabilité.

En fait, peut-être à cause des erreurs de mesure, des augmentations d'épaisseur ont été fréquemment constatées.

D'autre part, avec les seuls résultats dont on dispose aujourd'hui, il serait assez téméraire de chercher un modèle théorique pouvant rendre compte de l'irréversibilité supposée de l'usure. Enfin, l'avantage concret qu'on retirerait d'une méthode d'estimation qui tiendrait bien compte de la loi de probabilité de l'ensemble des mesures relatives à une même région d'une même bande serait peut-être assez faible, parce que, dans la variance de l'estimation du taux d'usure, elle ne réduirait au minimum que la part qui résulte de la dispersion de ces mesures entre elles. Or, les taux d'usure diffèrent aussi

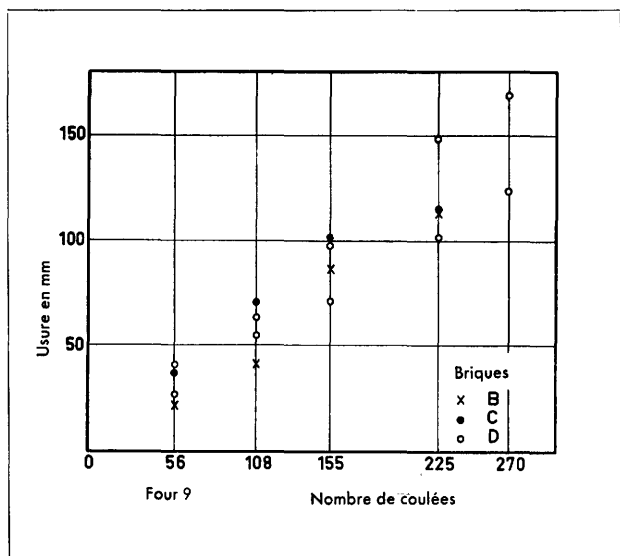


Fig. 27 — Moyennes des mesures en 4 points (four 9).

estimée au moyen de résultats de mesure de l'épaisseur répartis de façon quelconque au cours de la campagne du four.

Il est très commode de pouvoir caractériser la résistance à l'usure par ce paramètre que nous avons appelé «taux d'usure». S'il n'avait pas été possible de définir une grandeur de ce genre, on n'aurait pu comparer les épaisseurs de différentes voûtes qu'au bout d'un même nombre de coulées, condition qui n'était pas vérifiée par les données. Au point de vue statistique, le taux d'usure a l'avantage de pouvoir être calculé à partir de l'ensemble des résultats obtenus au cours de la campagne et d'utiliser par conséquent la totalité de l'information dont on dispose (fig. 27 et 28).

b) Estimation des taux d'usure

Pour trouver la meilleure méthode d'estimation statistique du taux d'usure, il faudrait théoriquement connaître la forme de la loi de probabilité de

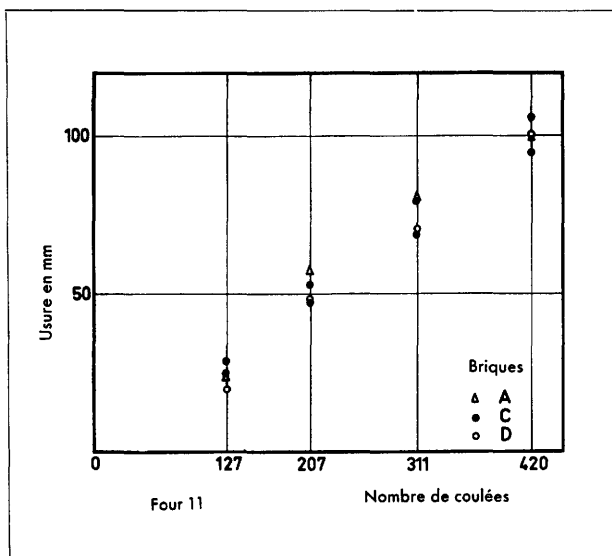


Fig. 28 — Moyennes des mesures en 2 ou 3 points (four 11).

les uns des autres sous l'effet de facteurs qui n'ont existé qu'à plus grande échelle, tant dans l'espace que dans le temps (direction de la flamme, par exemple).

Pour étudier l'effet des facteurs contrôlés du plan d'expérience, il n'est donc pas indispensable de connaître les meilleures estimations des taux d'usure.

Une méthode plus empirique, pourvu qu'elle ne dépende d'aucun facteur subjectif, peut suffire.

Nous avons employé la méthode des moindres carrés en la considérant uniquement comme telle. Elle a l'avantage d'être connue et de n'entraîner qu'à des calculs assez simples.

Nous avons déjà donné les raisons pour lesquelles ces taux d'usure n'ont pu être calculés que pour la région de la clé. Leurs valeurs numériques, exprimées en millimètres par 10 coulées, sont données dans le tableau XXII qui contient toutes les indications permettant d'identifier la bande considérée.

3. — Transformation des données

Il ne nous est pas possible de nous étendre sur les raisons qui conduisent à transformer les données au moyen d'une fonction bien choisie. Ces questions sont étudiées plus à fond dans des traités de statistique⁽¹⁾. Nous rappellerons seulement que, les résultats de la méthode de randomisation étant d'autant meilleurs que les interactions confondues avec l'erreur sont plus faibles, on a intérêt à utiliser une fonction des données qui ait pour effet de les réduire.

Même avant les essais, nous nous doutions que la différence des taux d'usure de deux bandes de natures données, placées dans des positions données, ne

pouvait être indépendante des conditions d'essai et, en premier lieu, du four utilisé pour les comparer.

En effet, lorsque l'allure est de moins en moins poussée, il arrive un moment où l'usure de la bande la plus résistante devient quasiment nulle. Au-dessous de cette allure, l'usure de la bande la moins résistante continuant quand même à décroître, la différence des taux d'usure ne peut rester constante.

L'hypothèse qui consiste à admettre que le rapport des taux d'usure des deux bandes données est indépendant du four dans lequel elles se trouvent placées paraît plus plausible que la précédente.

On peut généraliser et admettre que chacune des conditions d'essai agit par une constante multiplicative sur le taux d'usure. Sous cette hypothèse, le logarithme de ce taux est alors une fonction additive de termes représentant les effets des différents facteurs.

Les résultats expérimentaux semblent montrer que les différences des logarithmes des taux d'usure de deux réfractaires donnés sont cependant plus élevées dans les fours de grande capacité que dans les petits fours.

TABLEAU XXII
Taux d'usure en millimètres par 10 coulées⁽¹⁾ ⁽²⁾

Four n°	Moitié gauche		Moitié droite	
	Position		Position	
	2	1	1	2
1	C 6,42	A 36,51	B 24,27	D 16,29
2	D 16,75	D 8,87	C 6,51	A 17,44
3	B 19,35	C 13,41	D 12,69	B 9,16
4	A 9,95	B 2,25	A 9,71	C 3,54
7	D 2,17	C 2,31	D 2,28	B 2,05
8	A 6,10	A 11,14	B 1,49	C 1,56
9	D 4,45	D 3,94	C 4,04	B 4,62
10 ⁽³⁾	B 3,31	B 3,97	A 3,64	D 4,65
11 ⁽⁴⁾	C 2,51	C 3,07	D 3,07	A 2,73
12 ⁽⁴⁾	D 4,37	D 4,93	C 5,42	B 3,77
14	A 24,48	A 21,49	B 3,39	C 6,13
15	D 12,19	C 8,93	D 6,21	B 9,20
16	A 38,86	B 5,73	A 15,65	C 9,42

⁽¹⁾ Les chiffres placés après la virgule n'ont aucun caractère significatif, mais ils sont nécessaires dans les calculs statistiques pour éviter le cumul des erreurs.

⁽²⁾ A = Brique complètement transformée, faible porosité.

B = Brique moyennement transformée, faible porosité.

C = Brique moyennement transformée, porosité moyenne.

D = Brique complètement transformée, porosité moyenne et faible teneur en alumine.

⁽³⁾ Exceptionnellement les taux d'usure relatifs au four 10 ont été relevés au mur avant.

⁽⁴⁾ Pour les fours 11 et 12, on a tenu compte des mesures d'épaisseur des briques après démolition.

TABLEAU XXIII
Logarithmes des taux d'usure du tableau XXII

Four n°	Moitié gauche		Moitié droite	
	Position		Position	
	1	2	1	2
1	B 1,287	A 1,562	B 1,385	D 1,212
2	C 0,807	D 0,948	C 0,814	A 1,242
3	D 1,224	C 1,127	D 1,103	B 0,962
4	A 0,998	B 0,353	A 0,987	C 0,549
7	D 0,334	C 0,363	D 0,359	B 0,312
8	A 0,785	A 1,047	B 0,172	C 0,194
9	D 0,648	D 0,596	C 0,606	B 0,665
10	B 0,510	B 0,599	A 0,561	D 0,668
11	C 0,399	C 0,487	D 0,481	A 0,436
12	D 0,640	D 0,693	C 0,734	B 0,576
14	A 1,389	A 1,332	B 0,530	C 0,787
15	D 1,086	C 0,951	D 0,793	B 0,964
16	A 1,589	B 0,758	A 1,195	C 0,974

⁽¹⁾ Cf. par exemple: O. Kempthorne: «The design and analysis of experiments».

En fait, cette dépendance n'est pas significative ⁽²⁾, et les résultats numériques dont on dispose ne permettent donc pas de rechercher une fonction qui pourrait remplacer le logarithme.

Comme cette transformation réduit suffisamment l'importance des interactions gênantes, c'est sur les logarithmes des taux d'usure qu'a porté l'analyse des résultats.

4. — Interprétation des résultats

Les logarithmes des taux d'usures sont donnés dans le tableau XXIII dont la disposition reproduit celle du tableau XXII.

Ces résultats ont été analysés selon les méthodes indiquées au chapitre III «Plan des essais».

a) Fours du groupe I

L'analyse de variance est entièrement détaillée dans le tableau XXIV.

Dans le groupe a, les sommes de carrés de l'effet position et de l'interaction «briques × positions» peuvent, ces effets n'étant pas significatifs, être regroupées avec la résiduelle.

Dans le groupe c, on peut de la même façon regrouper avec la résiduelle les sommes de carrés de l'interaction «briques × positions» et de l'effet combustible.

Après ces regroupements, l'analyse de variance se présente de la façon indiquée dans le tableau XXV. (Comme nous l'avons déjà signalé au chapitre III «Plan des essais», la variance due à un facteur

TABLEAU XXIV
Fours du groupe I

Groupe	Facteur de variation	Somme de carrés	Degré de liberté	Variance ou carré moyen
a	Position	0,034 503	1	0,034 503
	Qualité des briques	0,527 762	3	0,175 921
	Interaction «briques × positions»	0,071 672	3	0,023 891
	Résiduelle	0,587 760	9	0,065 307
b	Moitiés de four	0,224 432	2	0,112 216
c	Usure moyenne des voûtes	50,370 958	1	
	Qualité des briques	1,581 701	3	0,527 234
	Interaction «briques × positions»	0,382 619	3	0,127 540
	Nature du combustible	0,366 469	3	0,122 156
	Tonnage du four	2,843 439	1	2,843 439
	Résiduelle	0,845 667	3	0,281 889

TABLEAU XXV
Fours du groupe I

Groupe	Facteur de variation	Somme de carrés	Degré de liberté	Rapport des variances	Signification ⁽¹⁾		
					N.S.	S ₁₀	S ₀₅
a	Qualité des briques	0,527 762	3	3,296		×	
	Résiduelle	0,693 935	13				
b	Moitiés de four	0,224 432	2				
c	Usure moyenne	50,370 958	1				
	Qualité des briques	1,581 701	3	2,975		×	
	Tonnage du four	2,843 439	1		16,047		
	Résiduelle	1,594 755	9				

(¹) N.S.: Non significatif. S₁₀: Significatif au niveau 10% ($F > F_{0,10}$)
S₀₅: Significatif au niveau 5% ($F > F_{0,05}$)

⁽²⁾ On verra plus loin que les briques B, C, D peuvent être considérées comme équivalentes. Si on les groupe ensemble et qu'on étudie la différence entre les logarithmes des taux d'usure de A et de B, C, D groupées, en fonction de la production de chaque four par coulée et par mètre carré de surface de bain, on trouve que le coefficient de corrélation des rangs de ces deux quantités est juste inférieur au seuil de signification de 10%.

doit être divisée par la résiduelle appartenant au même groupe.)

Les niveaux de signification figurent dans les trois dernières colonnes. Il est à noter que le premier rapport (3,296), bien qu'appartenant à la catégorie S_{10} , est très proche du niveau de signification à 5%. Avec 3 et 13 degrés de liberté, on a, en effet, $F_{0,05} = 3,41$.

b) Fours du groupe II (avec le four 7)

L'analyse de variance est entièrement détaillée dans le tableau XXVI.

Dans les sommes de carrés du groupe a, l'effet «briques» comparé directement à la résiduelle est significatif au niveau 10%, tandis que l'effet «positions» et l'interaction «briques \times positions» ne sont pas significatifs. En regroupant leurs sommes de carrés avec celle de la résiduelle, l'effet «brique» devient significatif au niveau 5%.

Dans les sommes de carrés du groupe c, aucun effet n'est significatif. Ceci s'explique par l'importance de la variance résiduelle, 13 fois supérieure à la résiduelle du groupe a (ce qui est significatif à 1%).

c) Fours du groupe II (avec le four 3)

L'analyse de variance est détaillée dans le tableau XXVII.

D'après les sommes de carrés du groupe a, l'effet position et l'interaction «briques \times positions» ne sont toujours pas significatifs. Sans même regrouper leurs sommes de carrés avec la résiduelle, on constate que l'effet «briques» est, par contre, significatif au niveau 5%.

Dans le groupe c, seul l'effet du tonnage est significatif.

d) Différences entre les qualités des briques

Les trois analyses de variance précédentes montrent que les quatre réfractaires ont des résistances à l'usure significativement différentes. Comme c'est surtout la brique A qui se distingue de façon nette des trois autres, il est permis de se demander si les qualités B, C, D diffèrent encore entre elles. Pour la signification des symboles A, B, C, D, voir la note (2) du tableau XXII.

Comme le plan comprend toutes les paires de bandes obtenues en associant chaque qualité en position 1 avec chaque qualité en position 2, on peut en extraire un carré gréco-latin 3×3 ne contenant que les qualités B, C et D associées de la même façon. Ce sous-ensemble de données peut alors être traité par l'analyse de variance. Nous ne nous étendrons pas sur les détails de cette étude, dont nous ne donnerons ici que la conclusion, qui est que les qualités autres que A ne diffèrent pas entre elles de façon significative.

e) Résumé des résultats des analyses de variance

1° Le facteur «position de la bande» n'a pas d'effet significatif.

2° L'interaction des facteurs «position» et «qualité des briques» n'a pas d'effet significatif.

3° Les résistances à l'usure des quatre réfractaires diffèrent entre elles de façon significative par rapport à la résiduelle a. Lorsqu'on compare leurs différences à la résiduelle c, elles ne sont significativement différentes que dans un cas, ce qui n'est pas étonnant vu la grande différence entre les variances résiduelles a et c.

Ce résultat expérimental confirme ce que nous avons annoncé dans le chapitre III «Plan des essais». les comparaisons faisant intervenir la variance entre

TABLEAU XXVI
Fours du groupe II (avec four 7)

Groupe	Facteur de variation	Somme de carrés	Degré de liberté	Variance, carré moyen	Signification (1)		
					N.S.	S_{10}	S_{05}
a	Position	0,004 692	1	0,004 692	×		
	Qualité des briques	0,536 534	3	0,178 845		×	
	Interaction «briques \times positions»	0,007 992	3	0,002 664	×		
	Résiduelle	0,474 771	9	0,052 752			
b	Moitiés de fours	0,212 776	2	0,106 388			
	Usure moyenne des voûtes	31,264 872	1				×
c	Qualité des briques	1,193 913	3	0,397 971	×		
	Interaction «briques \times positions»	0,427 340	3	0,142 447	×		
	Nature du combustible	1,799 168	3	0,599 723	×		
	Tonnage du four	1,356 060	1	1,356 060	×		
	Résiduelle	2,054 153	3	0,684 718			

(1) Voir tableau XXV

TABLEAU XXVII
Fours du groupe II (avec four 3)

Groupe	Facteur de variation	Somme de carrés	Degré de liberté	Variance, carré moyen	Signification (1)		
					N.S.	S ₁₀	S ₀₅
a	Position	0,003 660	1	0,003 660	×		
	Qualité des briques	0,603 025	3	0,201 008			×
	Interaction «briques × positions»	0,001 573	3	0,000 524	×		
	Résiduelle	0,441 971	9	0,049 108			
b	Moitiés de fours	0,214 096	2	0,107 048			
c	Usure moyenne des voûtes	40,940 802	1				
	Qualité des briques	0,443 844	3	0,147 948	×		
	Interaction «briques × positions»	1,579 193	3	0,526 398	×		
	Nature du combustible	0,483 758	3	0,161 253	×		
	Tonnage du four	3,886 812	1	3,886 812			×
	Résiduelle	0,493 913	3	0,164 638			

(1) Voir tableau XXV

fours sont beaucoup moins sensibles que celles faisant intervenir la variance entre bandes placées dans un même four. On peut affirmer sans crainte que si l'on avait comparé les quatre réfractaires en construisant 13 voûtes entières, on aurait eu de grandes chances de ne pas trouver de différences significatives entre leurs résistances à l'usure.

Pour comparer les effets des combustibles et des tonnages, il n'est évidemment pas possible d'utiliser une résiduelle d'un type différent de c.

L'effet du combustible n'est jamais significatif. L'effet du tonnage est significatif dans deux cas sur trois. Ceci peut s'expliquer peut-être par les différences de tonnages, qui sont plus accusées dans le groupe I et dans le groupe II avec le four 3 que dans le groupe II avec le four 7 (où l'effet du tonnage n'est pas significatif).

On peut voir (chapitre «Plan des essais») que les classes de tonnage du groupe I sont bien distinctes et que le tonnage du four 3 est très supérieur à celui du four 7.

Remarque

Malgré la présence de deux effets significatifs (nature du réfractaire, tonnage du four), la variance résiduelle c représente une part importante de la variance totale.

Les différences entre les taux d'usure constatées dans les différents fours ne paraissent pourtant pas pouvoir être mieux expliquées en faisant intervenir d'autres facteurs.

L'indice suivant: production par coulée et par mètre carré de surface de bain, n'est pas en meilleure corrélation avec l'usure que la capacité du four.

5. — Estimations des logarithmes des taux d'usure

Les logarithmes des taux d'usure peuvent être estimés conformément à la méthode exposée dans le paragraphe 5, d, du chapitre III.

L'estimation de l'effet b_j dû à la brique j est donnée par:

$$\hat{b}_j = \frac{D_{j.} - D_{.j}}{8}$$

Cette estimation peut être accompagnée de l'intervalle de confiance:

$$|\hat{b}_j - b_j| < s \cdot t_p \sqrt{\frac{3}{32}}$$

où t_p désigne le seuil de confiance de la variable t de Student-Fisher.

Les résultats de chacun des trois groupes de fours permettent d'estimer chaque b_j et de calculer un intervalle de confiance.

La longueur de ce demi-intervalle est indiquée dans la première ligne du tableau XXVIII. Les estimations des b_j figurent sur les lignes suivantes.

Ces résultats sont représentés graphiquement sur la figure 29.

TABLEAU XXVIII

Estimation de l'effet de la qualité de la brique sur le logarithme du taux d'usure lorsqu'on prend la qualité moyenne des quatre briques pour origine

	Groupe de fours		
	I	II (avec four 7)	II (avec four 3)
Demi-intervalle de confiance	0,177	0,159	0,153
Brique A	0,200	0,204	0,204
Brique B	-0,147	-0,095	-0,106
Brique C	-0,064	-0,127	-0,143
Brique D	0,011	0,017	0,045

Sans perdre de vue que les estimations obtenues au moyen de chacun des trois groupes de fours ne sont pas indépendants, on peut constater que ces estimations sont en bon accord les unes avec les autres.

Conclusions générales

L'analyse statistique des résultats d'essais montre que le taux d'usure de la brique A a été significativement plus élevé que ceux des briques B, C, D qui, eux, n'ont pas été significativement différents les uns des autres.

Le seul autre facteur ayant eu un effet significatif sur le taux d'usure a été le tonnage du four.

L'expérience acquise permet d'ajouter, en vue d'éventuels essais futurs, que:

1° Le nombre des points de mesure de l'épaisseur doit être suffisant;

2° La disposition de ces points doit être aussi uniforme que possible;

3° La précision de la mesure de l'épaisseur ne doit pas être négligée;

4° Il faut d'abord établir le plan d'essais en fonction de l'objet de l'étude, puis choisir les fours qui conviennent à l'exécution de ce plan. Si on se propose de comparer des réfractaires dans plusieurs types de fours, ceux-ci doivent former des catégories bien distinctes et aussi homogènes que possible. Enfin, les résultats obtenus dans un seul four n'étant nullement probants, il est important que chaque catégorie en comprenne plusieurs.

En effet, si pour comparer différents réfractaires pour voûtes de fours Martin il est certes inutile de

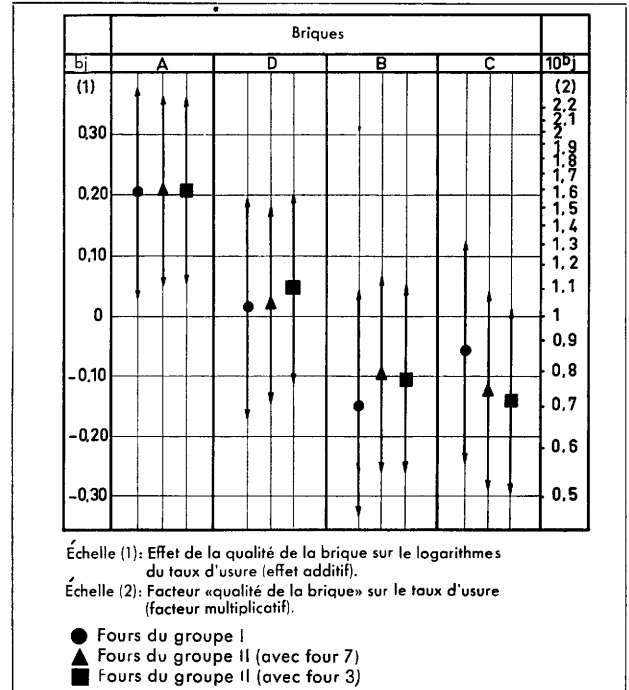


Fig. 29 — Effet de la qualité de la brique sur la logarithme du taux d'usure: facteur «qualité de la brique» sur le taux d'usure (facteur multiplicatif).

rechercher une très grande précision des résultats, il ne faut pas oublier que la mesure et même l'appréciation de l'usure d'une voûte sont sujettes à de nombreuses et importantes erreurs qui peuvent facilement fausser le jugement. Les précautions que nous venons d'énumérer nous paraissent à recommander pour éviter cette éventualité.

CHAPITRE VIII

Recherche d'un indice de qualité

Par J. BARON

RÉSUMÉ

En s'appuyant sur des travaux antérieurs relatifs en particulier à l'influence de la teneur en alumine et de la porosité sur la tenue en service des briques de silice pour voûtes de fours Martin, il a été possible de concevoir un indice de qualité de ces briques, en y ajoutant toutefois un facteur qui n'avait encore été que peu mentionné jusqu'ici. L'indice de qualité est basé sur la considération d'une porosité équivalente donnée par la formule suivante:

$$\text{Porosité équivalente} = \text{porosité vraie} + 20 \text{ Al}_2\text{O}_3 \\ - 50 \cdot (\text{densité absolue} - 2,30)$$

Cet indice décroît lorsque la qualité de la brique croît; il varie dans de faibles limites (15 à 40) et il a été avancé qu'une brique de qualité devait avoir une porosité équivalente inférieure à 25. Ainsi, le calcul de cet indice sur les briques d'essais à partir des caractéristiques moyennes a été le suivant:

- A: 29,5
- B: 23,2
- C: 23,4
- D: 23,2

L'influence du titane n'a pas été considérée dans la détermination de cet indice, mais des travaux effectués au laboratoire de Bonn semblent montrer que la teneur en titane est sans influence tant qu'elle ne dépasse pas 1%.

La recherche d'un indice de qualité est, d'une manière générale, un problème délicat à résoudre. Dans notre cas, la méthode à suivre consisterait à étudier le comportement en service d'un nombre de briques — caractérisées chacune à partir d'un échantillonnage soigneux —, nombre de briques suffisamment grand pour qu'on puisse établir une régression statistique entre les comportements observés et les caractéristiques mesurées au laboratoire.

En attendant qu'une étude de cette importance puisse être entreprise, nous avons, à titre d'essai, tenté d'apprécier l'influence que certaines caracté-

ristiques étaient censées avoir sur la tenue en service, repérée, par exemple, par la température de gouttage de la brique. Si on admet, *a priori*, que cette liaison existe, il n'est pas d'autre solution, dans l'état où nous en sommes, que d'utiliser les résultats des essais sur les quatre briques d'essais. Nous y sommes conduits par la comparabilité des essais au four Martin, qui résulte de la structure du plan d'expérience, par la reproductibilité toujours suivie dans les 13 fours d'essais du comportement relatif des quatre briques étudiées et enfin parce que ces briques, qui avaient fait l'objet de nombreuses déterminations en laboratoire, nous étaient bien connues.

Le dépouillement statistique des résultats obtenus en service montre que la brique A s'est révélée significativement inférieure aux briques B, C et D et que ces trois dernières n'ont pas montré de différence significative de comportement. Si on compare ces observations aux caractéristiques des quatre briques (fig. 30), on constate qu'une seule des caractéristiques (teneur en alumine, porosité ou degré de transformation) ne peut expliquer la même tenue en service des briques B, C et D. Nous avons donc fait intervenir simultanément les trois caractéristiques principales de la façon suivante:

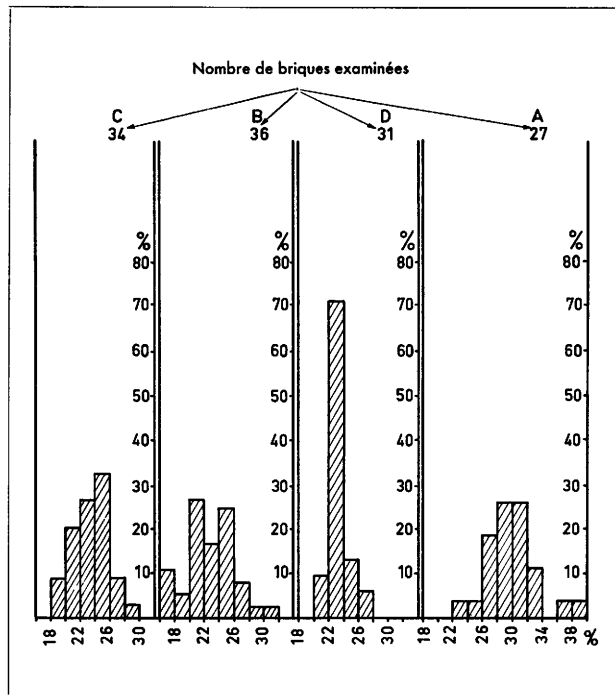


Fig. 30 — Porosités équivalentes.

On écrit que les briques B et C ne présentent pas d'écart de qualité avec la brique D choisie comme brique de référence et que la brique A a un point de goutte, déterminé expérimentalement, inférieur de 30° à celui des trois autres.

Les coefficients d'influence à déterminer sont:

a teneur en alumine	par 0,01 %
p porosité	par 0,1 %
d densité absolue	par 0,01 %

Dans ces conditions, les caractéristiques moyennes des briques conduisent au système d'équations:

$$\begin{aligned} A & 40a - 17p + 30 = 0 \\ B & 29a - 43p + 3d = 0 \\ C & 9a + 19p + 7d = 0 \end{aligned}$$

La résolution de ce système donne:

$$\begin{aligned} a & = -0,95 \\ p & = -0,47 \\ d & = 2,5 \end{aligned}$$

ce qui signifie approximativement que:

0,1% d'alumine en plus entraîne 10 points en moins,

1 % de porosité en plus entraîne 5 points en plus,

0,01 de densité absolue en plus entraîne 2,5 points en plus.

Ou encore que:

0,1% d'alumine en plus égale 2% de porosité en plus ou égale 0,04 de densité absolue en moins,

et aussi que:

1% de porosité en plus égale 0,02 de densité absolue en moins.

A partir de ces relations, on peut concevoir une porosité équivalente:

$$\text{porosité équivalente} = \text{porosité vraie} + 20 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 50 \cdot (\text{densité absolue} - 2,30)$$

que l'on peut retenir comme indice de qualité, la qualité d'une brique étant d'autant plus grande que sa porosité équivalente est plus faible. Ainsi, cette porosité équivalente a les valeurs suivantes pour les quatre briques d'essais:

$$A : 29,5 \quad B : 23,2 \quad C : 23,4 \quad D : 23,2$$

L'établissement de cet indice suscite cependant quelques commentaires.

A côté des facteurs principaux que nous avons fait intervenir, il est possible que d'autres influent aussi, et peut-être notablement, sur la qualité des briques de silice pour voûtes de fours Martin, comme la perméabilité, la granulométrie (on a aussi constaté une bonne tenue des briques à gros grains), etc.

Bien qu'il ne repose que sur les résultats d'étude de quatre briques, nous avons confiance en cet indice parce que ces briques ont été soigneusement examinées, tant au laboratoire qu'à l'aciérie, et parce que le classement des porosités équivalentes des briques habituellement utilisées dans les usines, porosités équivalentes qui varient de 15 à 40, correspond très sensiblement au classement des briques d'après les tenues en service. Par exemple, une brique ayant un indice de 38 s'est avérée plus mauvaise que la brique A (indice 30).

Il importera, dans un avenir proche, de soumettre cet indice à l'épreuve, en comparant les tenues relatives, dans une même voûte de four Martin, de plusieurs variétés de briques avec leurs indices de qualité déterminés au laboratoire.

On peut aussi faire remarquer que cet indice varie dans de faibles limites, disons de 15 à 40; mais nous avons vu que la température de goutte est intervenue dans cette détermination et qu'en pratique il s'agit effectivement de gagner quelques degrés dans la température du point de goutte. Pour pouvoir déterminer cet indice avec précision, il est donc essentiel que les caractéristiques utilisées pour le calculer soient déterminées avec précision. Les incertitudes résident, d'une part, dans la grande dispersion des résultats trouvés entre briques d'une même qualité, dispersion due à l'hétérogénéité des briques et au mode opératoire, et, d'autre part, dans les erreurs systématiques imputables aux méthodes

d'essais. Le prélèvement et l'étude d'un grand nombre de briques permettent de réduire les erreurs aléatoires; mais les effets des erreurs systématiques ne sont limités que si ces erreurs sont faibles et connues, au moins approximativement.

Les considérations précédentes laissent prévoir qu'un même laboratoire pourra, moyennant un nombre suffisant de déterminations, distinguer les qualités de deux briques inconnues, mais qu'il lui sera moins facile de fixer ces qualités de manière absolue. A titre indicatif, les dispersions des indices de qualité des quatre briques étudiées présentent des écarts types voisins de deux points pour les briques A, B et C (cet écart est un peu inférieur à un point pour la brique D); mais l'intervalle des indices trouvés sur toutes les briques d'une même qualité s'étend sur une douzaine de points (tableau XXIX).

qu'environ 0,10 %; mais chacun connaît l'influence néfaste de ces éléments.

Nous avons considéré seulement la porosité totale, parce que, dans toutes les briques examinées, la porosité fermée était toujours très faible et la porosité totale pouvait être assimilée à la porosité ouverte.

Quant à l'influence de la densité absolue, nous avons vu que la porosité équivalente était d'autant plus basse que la densité absolue était plus forte, mais il faudrait probablement tenir compte d'une limite supérieure à ne pas dépasser pour la densité absolue. Nous ne pouvons encore fixer cette limite. Signalons simplement que des briques de densité absolue égale à 2,42 se sont très bien comportées; mais il semble qu'au-delà d'une densité absolue de 2,44 les risques de destruction par écaillage augmen-

TABLEAU XXIX

Briques	Teneur en Al_2O_3 %	Porosité %	Densité absolue	Température de rupture à l'affaissement sous charge ° C
C	0,26	22,7	2,39	1 656
B	0,46	16,5	2,35	1 654
D	0,17	20,8	2,32	1 689
A	0,57	19,1	2,32	1 637

Pour juger de la qualité d'un lot, il ne faut pas se contenter de faire les déterminations sur une seule brique, mais sur un nombre aussi grand que possible, et d'autant plus élevé que l'hétérogénéité du matériau est plus forte. Si, par ailleurs, les erreurs systématiques commises sont de 0,01 sur la densité absolue, de 0,5 sur la porosité et de 0,10 sur la teneur en alumine, l'erreur absolue à craindre sur l'indice de qualité (s'ajoutant aux erreurs aléatoires précédentes) sera de $\frac{1}{2} + 2 + \frac{1}{2} = 3$ points.

Cet indice ne tient pas encore compte de la teneur en oxyde de titane. Certaines considérations, que nous ne pouvons développer ici, nous laissent croire que son influence est peu importante.

Si l'on considère seulement les points de fusion, c'est-à-dire les diagrammes $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$, on constate que 1 % d'alumine abaisse en moyenne le point de fusion de SiO_2 de 33° C, tandis que 1 % de TiO_2 l'abaisse en moyenne de 16° C; l'influence de TiO_2 serait donc deux fois moins néfaste que celle de Al_2O_3 , mais d'après M. Konopicky (1), TiO_2 exercerait une influence favorable en réduisant l'imprégnation de la brique par la scorie et il est possible que la résultante de ces deux influences se traduise par une influence peu néfaste de TiO_2 .

Nous n'avons pas fait non plus mention de la teneur en alcalins, parce que toutes les briques examinées au cours de cette étude n'en renfermaient

considérablement. Dans l'état actuel des choses, il nous semble préférable de limiter supérieurement la densité absolue à 2,43.

D'autre part, nous avons pensé qu'en contrepartie des avantages d'une densité absolue élevée (indice d'un faible degré de transformation) on pouvait craindre l'inconvénient d'une plus grande irrégularité dimensionnelle des briques. Une petite étude annexe a montré que la dispersion des dimensions des briques ne semblait pas dépendre du degré de transformation (2).

La structure de cet indice montre qu'une brique ayant une faible teneur en alumine pourrait, à la rigueur, présenter une porosité assez élevée; inversement, une brique à teneur en alumine plus forte devrait avoir une porosité aussi basse que possible.

Il est intéressant, à ce sujet, de rappeler les travaux faits à l'étranger dans ce domaine, en premier lieu ceux de M. Konopicky, déjà signalés. L'auteur indique que des briques moyennement transformées de densité 2,40 à 2,44 ne se sont en aucun cas plus mal comportées — elles ont parfois mieux tenu — que des briques dont la transformation avait été poussée. Les essais ont confirmé que l'alumine et les oxydes alcalins exercent une influence défavorable sur la tenue des briques. L'oxyde de titane régulièrement réparti est vraisemblablement avantageux, et une porosité supérieure à 25% est très défavorable; son influence se fait déjà sentir pour

(1) K. Konopicky: «Stahl und Eisen», 74 (1954), pp. 1402 à 1413.

(2) Voir la communication de J. Baron, A. Matraski et D. Sanna faite au Congrès technique de céramique, Paris, 1958.

des valeurs de l'ordre de 20 à 22 % si le four est poussé. Pour la même composition et une même porosité, la tenue est moins bonne quand la perméabilité dépasse $100 \cdot 10^{-3}$ cgs. L'auteur, en considérant seulement la porosité et la teneur en alumine, indiquait que la somme de la porosité et de douze fois la teneur en alumine devait être inférieure à 40. Il est intéressant de remarquer que l'indice indiqué par M. Konopicky, a savoir:

$$\text{Porosité} + 12 \text{ Al}_2\text{O}_3 \leq 40$$

a à peu près la même forme que le nôtre, à la densité absolue près.

Dans une communication au meeting d'automne de la «British Ceramic Society» à Londres en novembre 1956 (1), MM. Lahr et Hardy mettent en évidence le rôle considérable de l'alumine sur la qualité des briques de silice. Mais les auteurs nous ont indiqué que leurs essais étaient faits sur des briques presque complètement transformées de même porosité et de même teneur en oxyde de titane, et que, dans ces conditions, le facteur déterminant reste la teneur en alumine lié à la température d'affaissement sous charge (essai effectué selon une norme particulière) par la relation:

$$\begin{aligned} \text{T}^\circ \text{C d'affaissement sous charge} \\ = 1\,726^\circ \text{C} - 108 \text{ Al}_2\text{O}_3 \end{aligned}$$

formule peu différente de celle donnée par le Dr. Cross:

$$\begin{aligned} \text{T}^\circ \text{C d'affaissement sous charge} \\ = 1\,708^\circ \text{C} - 72 \text{ Al}_2\text{O}_3 \end{aligned}$$

En mars 1957, M. Fern (2), a rendu compte d'essais effectués pendant plusieurs années sur des voûtes de fours Martin et a indiqué qu'en réduisant la teneur en alumine de 1 à moins de 0,2%, la durée a presque été doublée malgré des productions horaires très élevées. Une étude statistique indique qu'une diminution de 0,10 % de la teneur en alumine des briques de silice est sensiblement équivalente à une diminution de 1 % de leur porosité apparente. La meilleure qualité des briques de silice correspondrait, d'après cet auteur, aux caractéristiques suivantes:

teneur en alumine: 0,2 %,

teneur en oxydes alcalins: — de 0,1 %,

porosité apparente inférieure à 20 %.

L'un des quelques rares moyens permettant d'améliorer encore cette qualité consiste à diminuer la porosité des briques. A ce sujet, il est intéressant de noter que M. Fern indique qu'une diminution de 0,10 % de la teneur en alumine est sensiblement équivalente à une diminution de 1 % de leur porosité, alors que nous avons trouvé qu'une variation de 0,1 % correspondrait à une variation de 2 % en porosité.

Comme on le voit, tous les auteurs sont d'accord sur l'influence néfaste de l'alumine. M. Konopicky a ajouté à ce facteur l'influence néfaste de la porosité, et les essais qui viennent d'être faits montrent que probablement aussi la densité absolue intervient.

(1) H. R. Lahr et C. W. Hardy: «Refractoriness - under - Load Properties of Silica Bricks», Trans. of the British Ceramic Society, 56 (1957), pp. 369 à 388.

(2) W. M. Fern: «Improvements in the Quality of Silicia Roof-Bricks», Trans. of the British Ceramic Society, 56 (1957), pp. 110 à 132.

CHAPITRE IX

Essais effectués sur des briques usagées

Par K. KONOPICKY
(Traduit de l'Allemand)

RÉSUMÉ

Remarques relatives au processus de l'usure

a) L'épaisseur de la couche de cristobalite par rapport à toute la zone d'imprégnation augmente avec la température de la voûte.

b) Dans les fours à allure peu poussée, il se produit une nette différenciation en zones, tandis que, dans les fours à allure très poussée, on n'observe pratiquement pas de formation visible de zones, ni de migration des fondants. Dans le cas des fours à allure poussée, les briques fondent plus vite que ne se fait la migration des fondants.

c) Dans la brique de silice, la phase liquide ne chemine avec une vitesse notable que si elle contient une quantité appréciable d'oxyde de fer.

d) La teneur maximum en Fe_2O_3 s'abaisse (dans la zone chaude de la brique) quand la température à l'intérieur du four croît. Bien entendu, ce n'est pas la teneur en Fe_2O_3 seule qui est caractéristique, mais les teneurs en CaO et Fe_2O_3 , c'est-à-dire que, pour une plus forte teneur en CaO dans les briques, la composition de la couche la plus chaude est modifiée et l'attaque est accentuée.

e) La teneur en TiO_2 abaisse la valeur maximum pour Fe_2O_3 , c'est-à-dire que TiO_2 freine l'absorption de Fe_2O_3 .

f) Dans les mélanges synthétiques (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO) pauvres en fer — en opposition aux mélanges riches en fer —, le TiO_2 n'abaisse pas la résistance pyroscopique tant que sa teneur est inférieure à 1%, ce qui signifie qu'une teneur en TiO_2 allant jusqu'à 1% environ est avantageuse, sauf peut-être pour les fours à allure très poussée.

g) Dans la zone froide de la brique, il se forme une phase liquide qui se solidifie à 1 160° environ. La teneur en SiO_2 de cette phase liquide est comprise entre 55 et 70%, les fondants constituant le complément. C'est pourquoi l'enrichissement en CaO au commencement de la zone froide est plus grand dans les briques pauvres que dans les briques riches en TiO_2 .

h) En dehors de l'usure dans la zone chaude (usure qui est déterminée par Fe_2O_3 et CaO, et par la température du four), il se produit également une attaque au voisinage de la zone tridymitique par suite de l'écoulement

de la phase liquide. Dans cette zone, la teneur en Al_2O_3 augmente également, ce qui explique d'une manière déterminante cet écoulement de la phase liquide.

i) C'est pourquoi l'usure est conditionnée, suivant la température du four et l'évolution de cette température, non seulement par la zone la plus chaude (Fe_2O_3 et CaO), mais aussi par la zone centrale (Al_2O_3). C'est d'ailleurs en raison de la plus grande longueur du cycle thermique dans les grands fours, pour lesquels la zone centrale des briques de voûte est la plus importante, que ces grands fours présentent un nombre plus faible de semaines de marche.

Le comportement des différents types de briques dans les fours Martin a été évalué précédemment pour les quatre qualités de briques étudiées. Mais il semble souhaitable d'approfondir ces connaissances par une étude plus précise des briques usagées qui ont été scorifiées. Pour une étude systématique des processus de détérioration, il est alors inutile de procéder à d'autres séries d'essais dans le but d'étayer plus solidement les conclusions. Pour cette raison, on a comparé les briques usagées de tous les fours étudiés, et l'on a déterminé sur plusieurs briques, pour chaque qualité et chaque four, toutes les caractéristiques chimiques (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , alcalis), physiques (poids spécifique, densité apparente, porosité totale, pores ouverts, répartition des grosseurs de pores) et minéralogiques (lame mince, examen aux rayons X de la cristobalite, de la tridymite, du quartz, etc.). Il était en effet impossible de voir de prime abord quels renseignements fondamentaux et quels résultats étaient nécessaires pour tirer les conclusions finales.

Environ 80 briques ont été étudiées par zone (550 zones environ), et tous les résultats ont été interprétés; mais nous ne donnerons ici que quelques exemples caractéristiques.

Exécutions des essais

En ce qui concerne l'analyse chimique, les dosages ont été effectués à l'aide des procédés normalisés; ce n'est que pour déterminer la valeur de Al_2O_3 qu'il fut nécessaire de procéder à un dosage direct à l'oxyquinoléine⁽¹⁾ ⁽²⁾. Les essais effectués avec cette méthode font l'objet de rapports spéciaux⁽³⁾: en effet, la précision du dosage par différence est trop faible et il ne permet généralement pas de déterminer la proportion d'oxydes étrangers (comme par exemple Mn, Cr) qui ont pénétré, d'où une surestimation des teneurs en Al_2O_3 ⁽³⁾.

En ce qui concerne les essais physiques, la répartition des grosseurs de pores a été déterminée à l'aide de la méthode d'imprégnation de mercure sous pression; les autres procédés utilisés correspondent aux normes.

TABLEAU XXX

Augmentation ou diminution des teneurs en Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , par la perte par fusion, rapportées à la longueur initiale et à l'analyse de la brique non usagée

Four 11						
Brique	Perte par fusion en %	Côté chaud jus-qu'au FMF cm ⁽¹⁾	Al_2O_3 %	TiO_2 %	CaO %	Fe_2O_3 %
D arrière	64	7,9	-42	—	-47	+490
A avant	62	8,8	-60	-49	-37	+140
C arrière	77	4	-55	-75	-66	+65
C avant	60	8,5	-5	-42	-37	+390
Four 12						
D avant	58	7,8	-31	—	-46	+ ~ 700
B avant	62	5,3	-28	-50	-32	+ 225
Four 2						
D	70	6,2	-32	—	-52	+110
A	57	8,6	-55	-42	-53	+130
C gauche	55	8,7	(+95)	-41	-27	+282
B	63	8,3	(+10)	-50	-32	+53
Four 4						
C	43	8,1	-42	-36	-28	+130
Four 1						
D	56	5,5	-21	—	-42	+110
A avant	71	5,5	-61	-63	-69	-69
B avant à droite	55	3,0	-62	-75	-75	-77

⁽¹⁾ FMF = front de migration des fondants.

⁽¹⁾ H. Pranter et K. Konopicky: «Radex-Rdsch.», (1948), pp. 61 à 63.

⁽²⁾ Cf. «British Provisional Specification».

⁽³⁾ K. Konopicky et Stumpf: Le dosage direct de l'alumine dans les briques de silice, «Tonind.-Ztg.» (à paraître prochainement).

On s'est heurté à des difficultés particulières pour l'analyse aux rayons X. En premier lieu, il a fallu corriger toutes les valeurs en raison de l'affaiblissement des interférences dues aux oxydes de fer et souvent aussi à la wollastonite. On a utilisé comme substance étalon du cristal de roche pur, de la cristobalite obtenue par dévitrification à partir de verre de silice et une tridymite obtenue, dans un four à coke, après une marche de 20 ans, d'une brique de silice à des températures voisines de 1 400 ° C. Il n'est pas indispensable que ces substances étalons, bien que soigneusement choisies et étudiées, aient une disposition cristalline correspondant tout à fait aux constituants minéraux de la brique, car ceci pourrait donner lieu à une certaine imprécision dans l'interprétation quantitative. L'importance des différences observées dans l'état d'ordre des cristaux de cristobalite et de tridymite ne justifiait pas de corrections après la publication Flörke (1). Pour des teneurs élevées en Fe₂O₃, CaO et TiO₂, on a également pu déceler aux rayons X la magnétite, la

wollastonite et le sphène. Les détails de la méthode d'examen aux rayons X sont donnés dans d'autres rapports (2).

On n'a pas cherché à savoir si, lors du refroidissement, les fondants cristallisent complètement ou seulement partiellement, autrement dit s'il reste encore du verre résiduel dans la brique refroidie; mais cela est sans importance pour la suite des observations.

Répartition des températures dans la brique

Pour la plupart des briques de silice usagées, on peut très bien observer la surface limite entre la cristobalite et la tridymite. Le front de migration des fondants du côté froid correspond à une température d'environ 1 160 °. Ces températures sont confirmées non seulement par les mesures effectuées sur la brique Sanna, mais aussi par l'examen au microscope chauffant. A cette température, on observe un net déplacement de la phase liquide sur

TABLEAU XXXI
Composition de la phase liquide au front de migration (moyennes)

Brique	Température de la voûte en ° C	Verre en %	SiO ₂ en %	Al ₂ O ₃ en %	Fe ₂ O ₃ en %	TiO ₂ en %	CaO en %
B	1 685 ° C	6,8	70,2	7,0	3,2	7,2	12,4
	1 650 ° C	12,0	54,9	3,3	9,9	7,4	24,5
	1 625 ° C	12,1	61,3	1,7	9,8	6,6	20,6
C	1 685 ° C	12,4	68,3	1,8	4,2	6,5	19,2
	1 650 ° C	14,3	65,3	2,4	15,6	6,2	22,6
	1 625 ° C	17,0	54,3	2,5	17,2	7,4	20,6
D	1 685 ° C	13,4	69,4	1,4	3,2	—	26,0
	1 650 ° C	13,6	60,0	1,2	11,0	—	27,8
	1 625 ° C	16,0	63,2	2,0	12,0	—	22,8
A	1 685 ° C	8,7	69,0	3,4	4,1	9,4	14,1
	1 650 ° C	15,8	47,5	7,8	10,0	11,4	23,3
	1 625 ° C	15,8	50,1	5,0	13,4	8,0	23,6

TABLEAU XXXII
Comparaison relative de la tenue des briques en service

Numéro du four	Teneur maximum de Fe ₂ O ₃ dans les briques en %	Comparaison de la tenue en service
4	1	B > C >> A
1	1—3	D = B >> A
16	1—5	B > C >> A
14	3—5	B > C >> A
8	3—5	B = C >> A
2	4	D = C > A
3	5	B > D > C
9	5—7	D = B > C
7	5—7	D = C = B
15	6	D = C > B
11	6—10	D = C = A

(1) O. W. Flörke: «Ber. Deutsch. Keram. Ges.», 34 (1957), cahier 11, pp. 343 à 390.

(2) K. Konopicky et I. Patzak: Contribution sur l'analyse aux rayons X des briques de silice. «Ber. Deutsch. Keram. Ges.» (à paraître prochainement).

la coupe visée obliquement. Étant donné que la température à l'intrados de la voûte du four est connue, on peut évaluer approximativement la répartition de la température en fonction de l'épaisseur des briques. La figure 31 montre la répartition de la température pour différentes briques, en même temps dans un four à allure chaude et dans un four à allure froide: la plupart des cas correspondent au four 4. Il est évident que, pour les fours à allure froide, la température diminue d'une façon plus rapide en fonction de l'épaisseur de la brique, ce qui tend à prouver que la couche de cristobalite contenant beaucoup de fer abaisse considérablement l'influence du rayonnement, qui constitue à haute température le facteur principal de la transmission de chaleur.

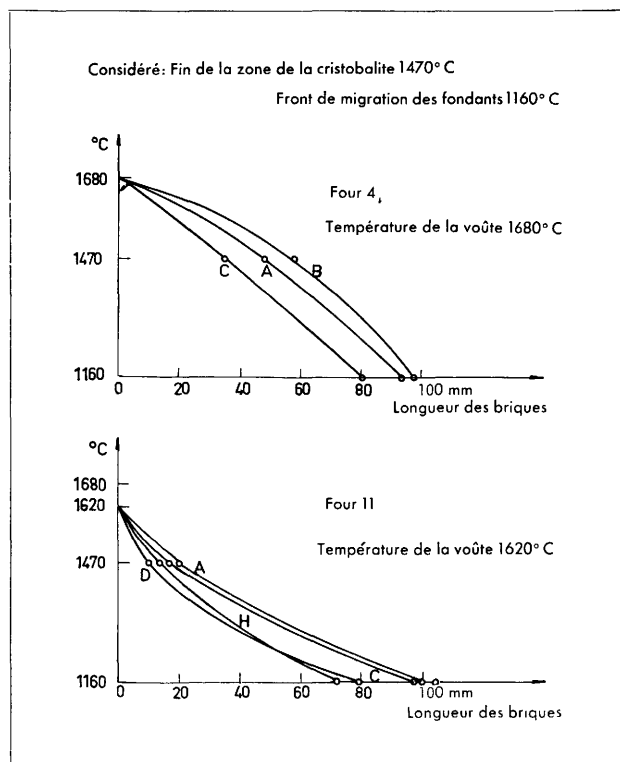


Fig. 31 — Variation de la température dans les briques de silice usagées.

D'un point de vue purement qualitatif, on a observé que, dans les fours les plus chauds, la zone de cristobalite était plus épaisse comparativement à toute la zone altérée.

Pour les fours à allure très poussée, la limite entre la zone de cristobalite et la zone de tridymite n'a pu naturellement être déterminée avec certitude que par analyse aux rayons X. Ce rapport a été porté sur la figure 32 en fonction de la température de la voûte. On voit que, jusqu'à environ 1660°, on peut trouver un rapport constant d'environ 0,22, mais qu'on peut atteindre très rapidement des valeurs d'environ 0,55 à des températures de 1690°.

Lorsqu'on se représente les processus qui se déroulent pendant l'usure, il faut distinguer les facteurs dus au four et ceux relatifs aux briques. En ce qui concerne les premiers, c'est surtout la tempé-

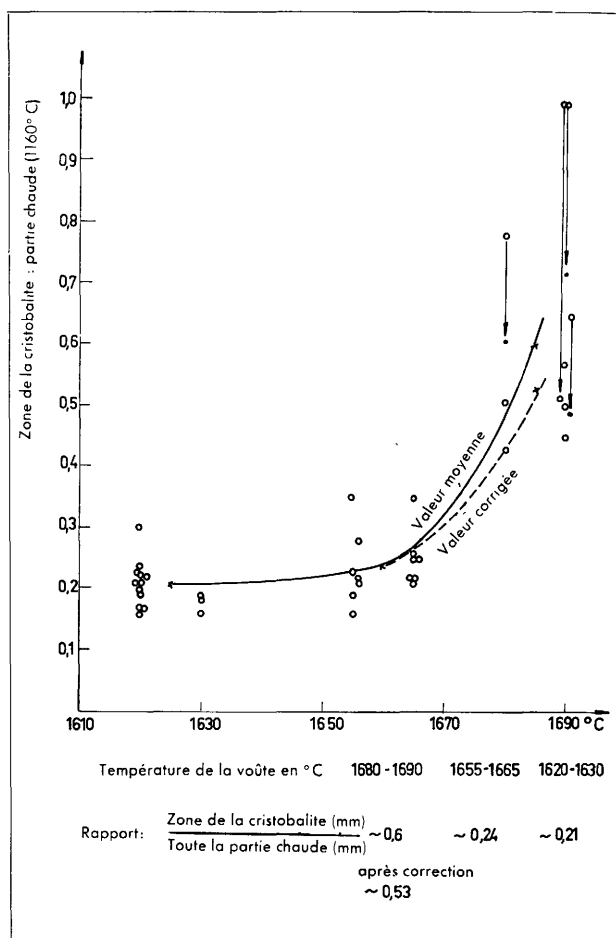


Fig. 32 — Température de la voûte et rapport zone de la cristobalite à toute la zone chaude.

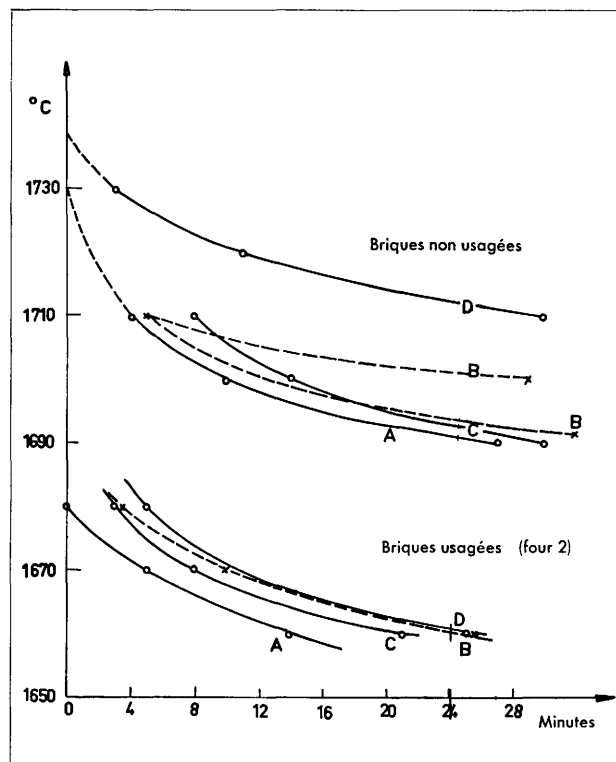


Fig. 33 — Points de goutte des briques de silice usagées et non usagées.

rature maximum qui intervient, parfois le gradient de température dans la brique, peut-être aussi le cycle thermique du four, les poussières et les courants gazeux. C'est ainsi que le profil de la voûte présente toujours une usure maximum entre la clé de voûte et le mur arrière, conformément à la circulation des courants gazeux et à la quantité de poussières. Les facteurs relatifs aux briques sont, comme l'ont montré nos récents essais, les teneurs en Al_2O_3 , alcalins et TiO_2 , la porosité, la répartition des pores (granulométrie choisie) et le degré de transformation.

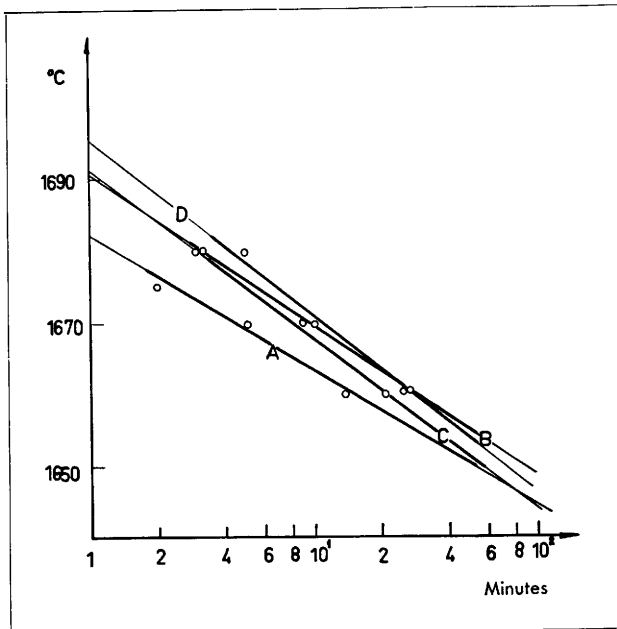


Fig. 34 — Points de goutte des briques usagées (four 2).

Point de goutte — Analyse des gouttes

On avait observé pendant la campagne d'essai que le «point de goutte» des quatre types de briques étudiés était d'environ 1680° pour les qualités D, B et C, mais de 1650° seulement pour la qualité A. Pour expliquer ce fait, des éprouvettes prises dans des briques à étudier ont été chauffées dans un four pour résistance pyroscopique et maintenues à des températures données; on a déterminé le temps s'écoulant jusqu'à la formation d'une goutte en fonction de la température du four (figures 33 et 34). La brique D a également donné les meilleurs résultats pour cet essai, ce qui ne concorde pas avec son comportement en pratique.

On obtient une image tout à fait différente avec le même essai lorsqu'on utilise des briques usagées et que l'on étudie la formation de gouttes dans la zone la plus chaude. Les essais sont très difficiles à réaliser, parce que le front de migration est parfois trop fortement chauffé et que la brique se rompt à cet endroit. On a été étonné de constater que les briques usagées D, B et C avaient un comportement à peu près semblable, tandis que les résultats étaient nettement plus mauvais pour la brique A.

Étant donné que, selon Speith⁽¹⁾, le «point de goutte» est une propriété du matériau et évolue parallèlement à la tenue en service, il faut conclure des résultats ci-dessus que l'absorption d'éléments étrangers (et avant tout l'oxyde de fer) modifie les facteurs contribuant à la formation et au détachement de la goutte. L'absorption d'oxyde de fer abaisse probablement beaucoup plus la viscosité de la phase liquide dans la brique D que dans les briques B et C, tandis que, pour la brique A, la viscosité de la phase liquide est abaissée au-dessous de celle des briques B et C.

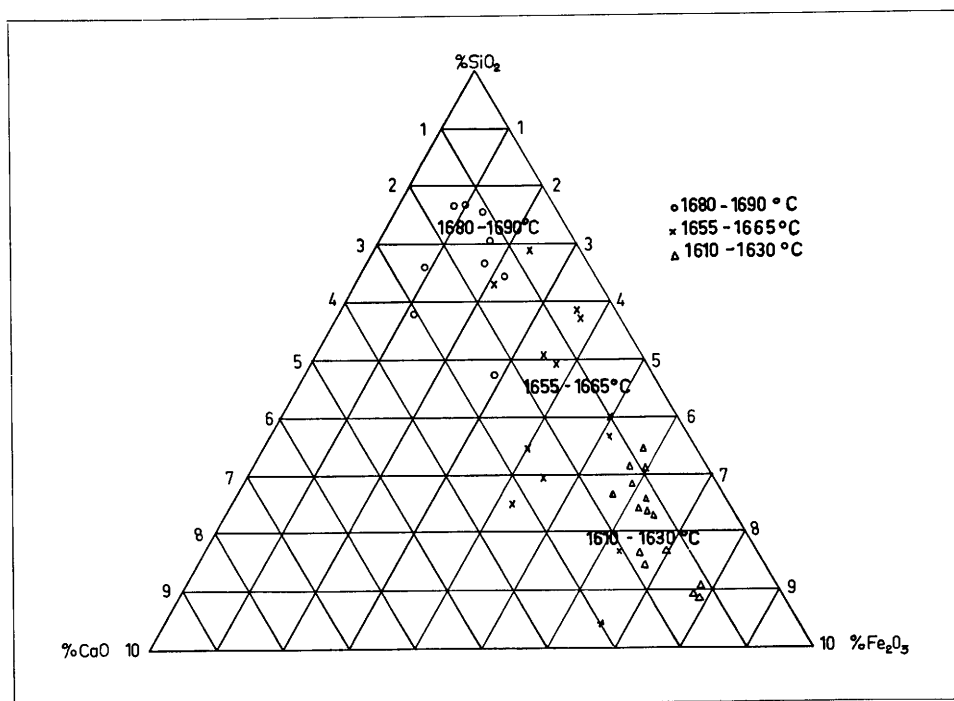


Fig. 35 — Analyse des gouttes et température de la voûte.

(1) K. G. Speith et G. Engels: «Stahl und Eisen», 70 (1950), pp. 861 à 867.

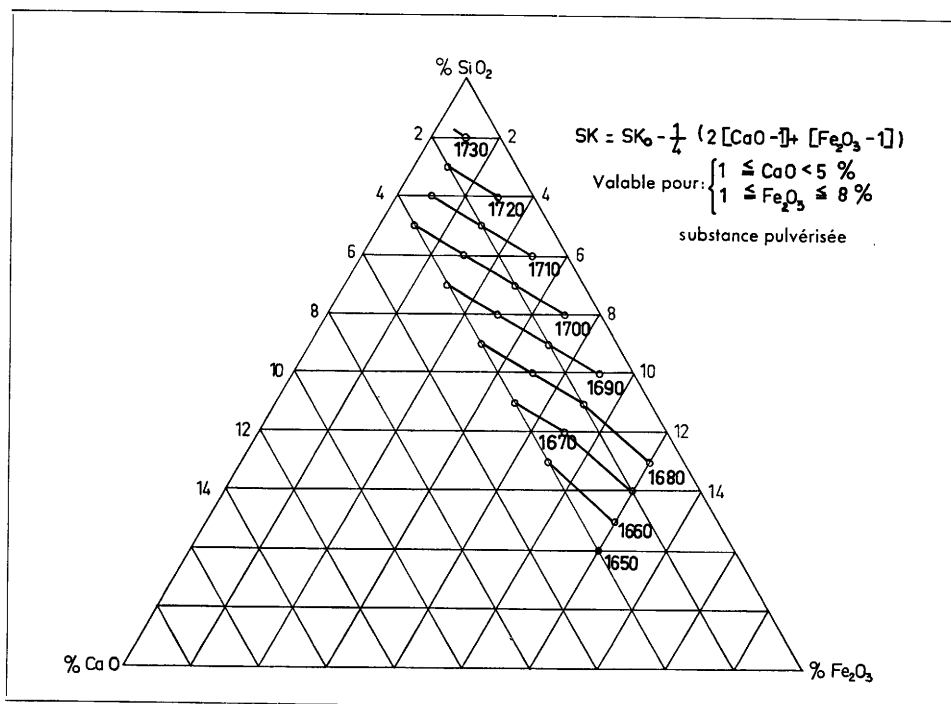


Fig. 36 — Composition des montres pyroscopiques.

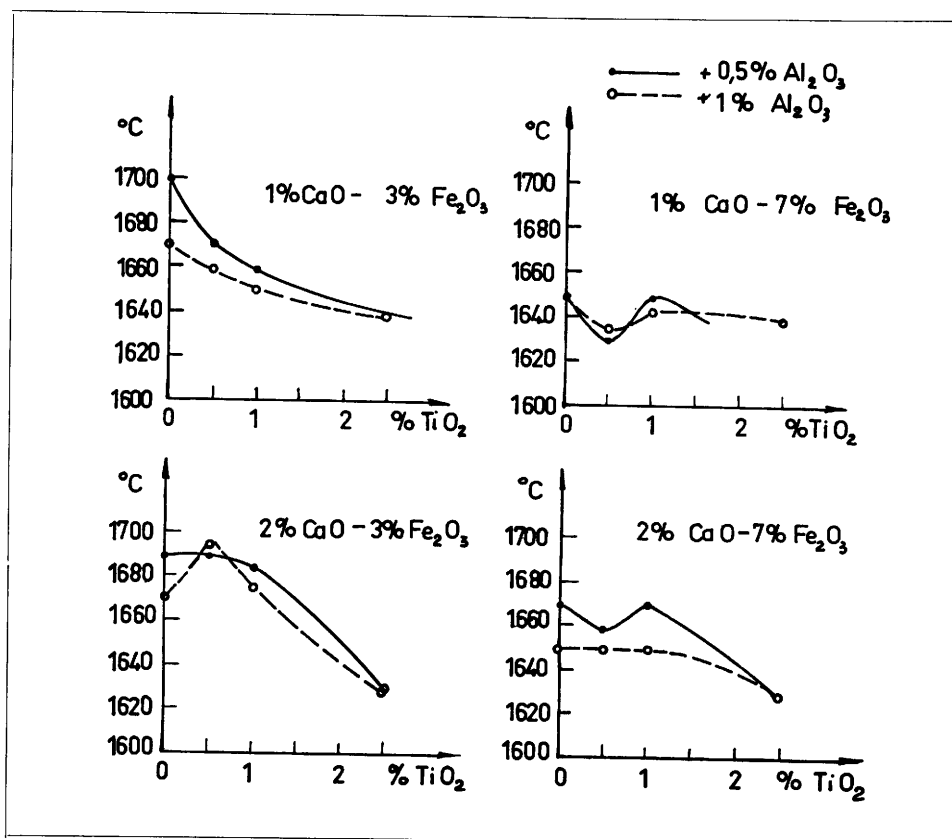


Fig. 37 — Points de chute des compositions synthétiques des montres pyroscopiques.

En comparant le comportement avec la composition moyenne des briques d'essai, on est amené à conclure qu'une teneur un peu élevée en Al_2O_3 peut être compensée par une teneur moyenne en TiO_2 ; mais pour une teneur trop élevée en Al_2O_3 ou en TiO_2 , la température du « point de goutte » s'abaisse considérablement.

Si l'on inscrit l'analyse de la goutte sur le diagramme $\text{SiO}_2\text{-CaO-Fe}_2\text{O}_3$, les différents points se groupent (figure 35) suivant la température de la voûte. La teneur en CaO de la goutte reste à peu près la même, tandis que la teneur en Fe_2O_3 augmente considérablement lorsque la température du four s'abaisse. En vue d'obtenir une confirmation,

les mélanges correspondants de quartz finement pulvérisé, de CaO et de Fe_2O_3 ont été calcinés au préalable; on a façonné des cônes avec ces mélanges et l'on a déterminé les résistances pyroscopiques (figure 36). Pour une teneur croissante en CaO, mais surtout pour une teneur croissante en Fe_2O_3 , leur résistance pyroscopique diminue continuellement dans le domaine étudié. Le parallélisme entre la composition des gouttes et la température du four est frappant. Il faut tout d'abord bien se rendre compte que, sur la face interne de la brique de silice, il s'écoule une phase liquide très riche en CaO et Fe_2O_3 , un équilibre entre les teneurs en CaO et Fe_2O_3 s'établissant pour la température maximum du four. Plus la température de la voûte est basse, plus la phase liquide qui s'écoule est riche en oxyde de fer.

Il fallait aussi vérifier la question de savoir si l'influence de TiO_2 dans des mélanges synthétiques

de CaO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 se manifeste dans le sens des hypothèses précédentes. Afin d'éviter une quantité d'essais qu'il serait impossible de grouper d'une façon claire, on ne s'est servi, pour cette série d'essais, que des teneurs caractéristiques en CaO et Fe_2O_3 ; on a fait varier la teneur en Al_2O_3 entre 0 et 1 % et la teneur en TiO_2 entre 0 et 3 % (figure 37). La résistance pyroscopique est nettement abaissée par Al_2O_3 même en faible quantité. Cette influence de l'alumine est plus faible en présence d'une teneur moyenne en TiO_2 .

Structure des zones dans les briques

On a effectué une analyse systématique des zones de toutes les briques usagées en utilisant, dans la plupart des cas, les différences de couleur ou de texture, pour différencier ces zones.

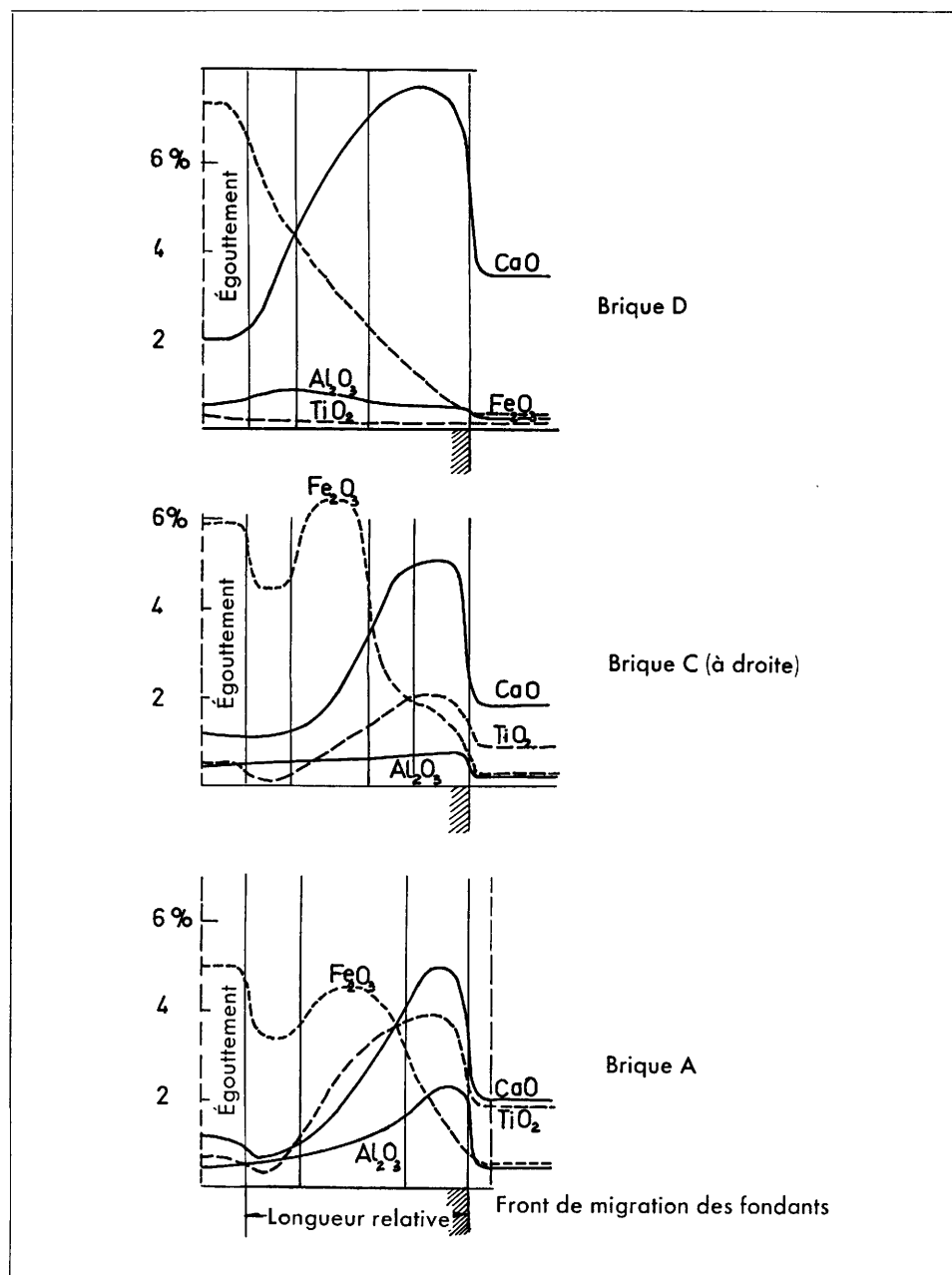


Fig. 38 — Analyses caractéristiques de zones de quelques briques d'essai (four 2).

Étant donné que les zones se déplacent au fur et à mesure de l'usure des briques et que la différence entre la température de la face interne et celle du front de solidification des fondants est pratiquement constante, on a posé d'une façon générale, aux fins de comparaisons, que l'épaisseur entre la face chaude de la brique et le front de migration était égale à 100. Les types de briques ne contenant pas de TiO_2 et ceux ayant des teneurs moyenne et élevée en TiO_2 se différencient considérablement par leur usure (figure 38); sur cette figure sont comparés ces trois types de briques du même four. Il est particulièrement frappant de voir ici que la teneur en CaO dans la brique D est beaucoup plus élevée. La teneur en CaO du côté chaud présente une zone de répartition beaucoup plus large, tandis que, dans la brique la plus riche en TiO_2 (brique A), elle est plus faible; il y a en outre une zone de

répartition plus étroite du côté froid. On voit en outre que, pour les briques à teneur moyenne en TiO_2 , cette teneur évolue parallèlement avec la teneur en CaO , tandis que, pour une forte teneur en TiO_2 , l'évolution semble s'effectuer en partie avec la migration de Fe_2O_3 vers le côté le plus froid. La teneur en Al_2O_3 s'accroît généralement avec la teneur en CaO du côté froid; dans un certain nombre de cas, l' Al_2O_3 provenant de l'atmosphère du four (cas, par exemple, de riblons contenant de l'Al) parvient à la brique, et les différences s'estompent.

On a essayé de reproduire cette migration, après un chauffage de longue durée à 1600° , en provoquant un gradient de température dans la brique insérée dans la paroi d'un four à gaz. Du fait de l'absence d'oxyde de fer dans l'atmosphère du four, on n'a pas pu observer, même après une semaine, de migration appréciable des fondants. Le contact

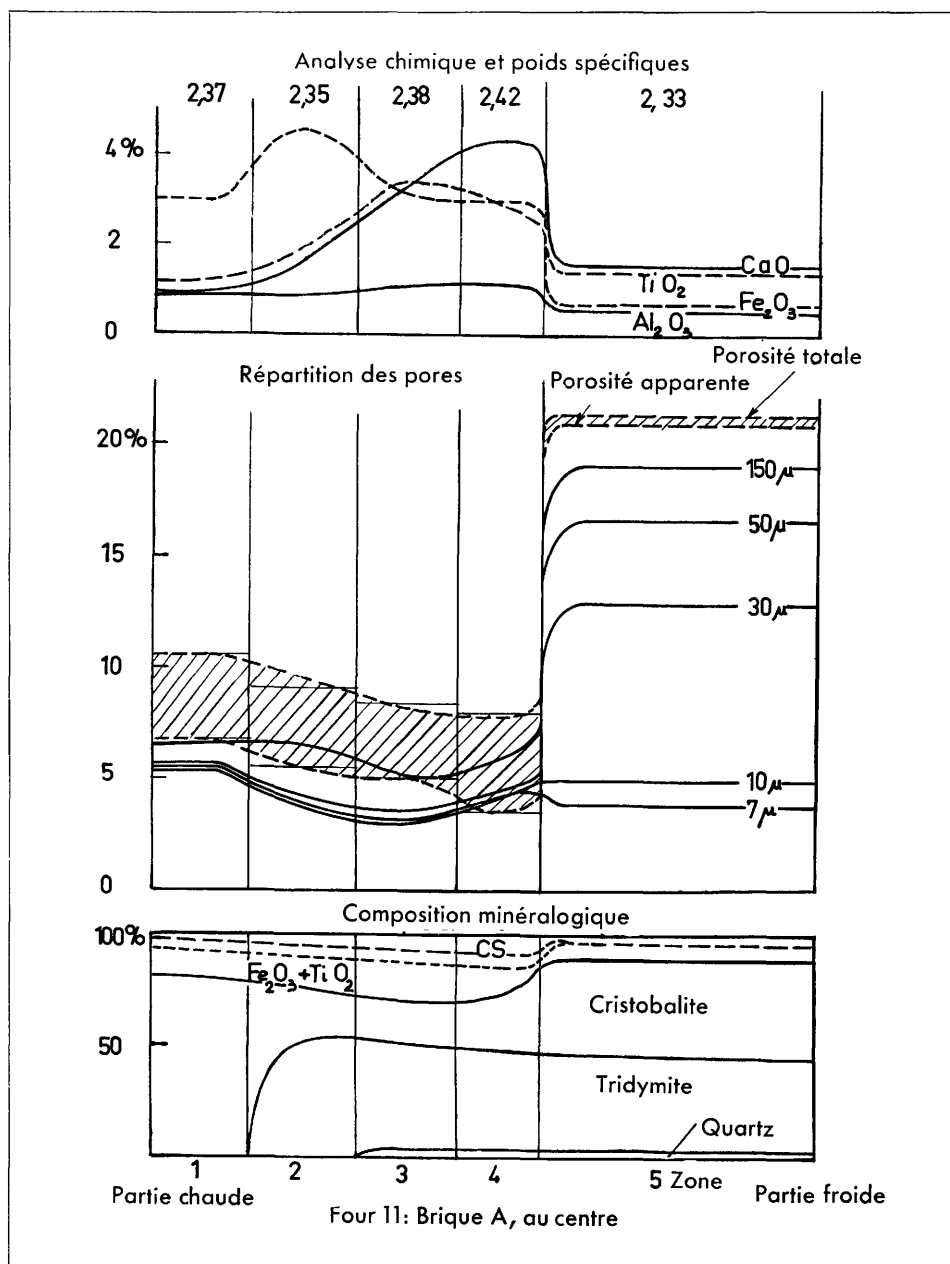


Fig. 39 — Structure en zones d'une brique de silice scorifiée.

avec l'oxyde de fer est la condition nécessaire à une vitesse de migration appréciable; ceci s'explique par la grande diminution de viscosité du silicate de chaux fondu sous l'influence des oxydes de fer.

Les figures 39, 40, 41 et 42 donnent d'autres exemples choisis pour un four à allure modérée et un four à allure poussée; elles représentent l'évolution des caractéristiques chimiques, physiques et minéralogiques des zones: poids spécifique, répartition des pores et teneurs en quartz, cristobalite et tridymite (ces dernières déterminées aux rayons X). On voit que, pour le four à allure modérée, la porosité totale a été considérablement abaissée dans

toutes les zones par la formation et la migration de la phase liquide. Les différences qui apparaissent entre la détermination de la répartition des pores et les résultats de l'évaluation des pores fermés par imprégnation à l'eau doivent probablement être attribuées au fait que, en raison de la petitesse des échantillons, la détermination de la répartition des pores dépend non seulement des hétérogénéités éventuelles dans les zones de la brique, mais aussi du découpage des éprouvettes qui ouvre différents pores et petits canaux. La comparaison des figures 39 et 40 montre que, étant donné que les autres conditions sont très semblables, et du fait de la

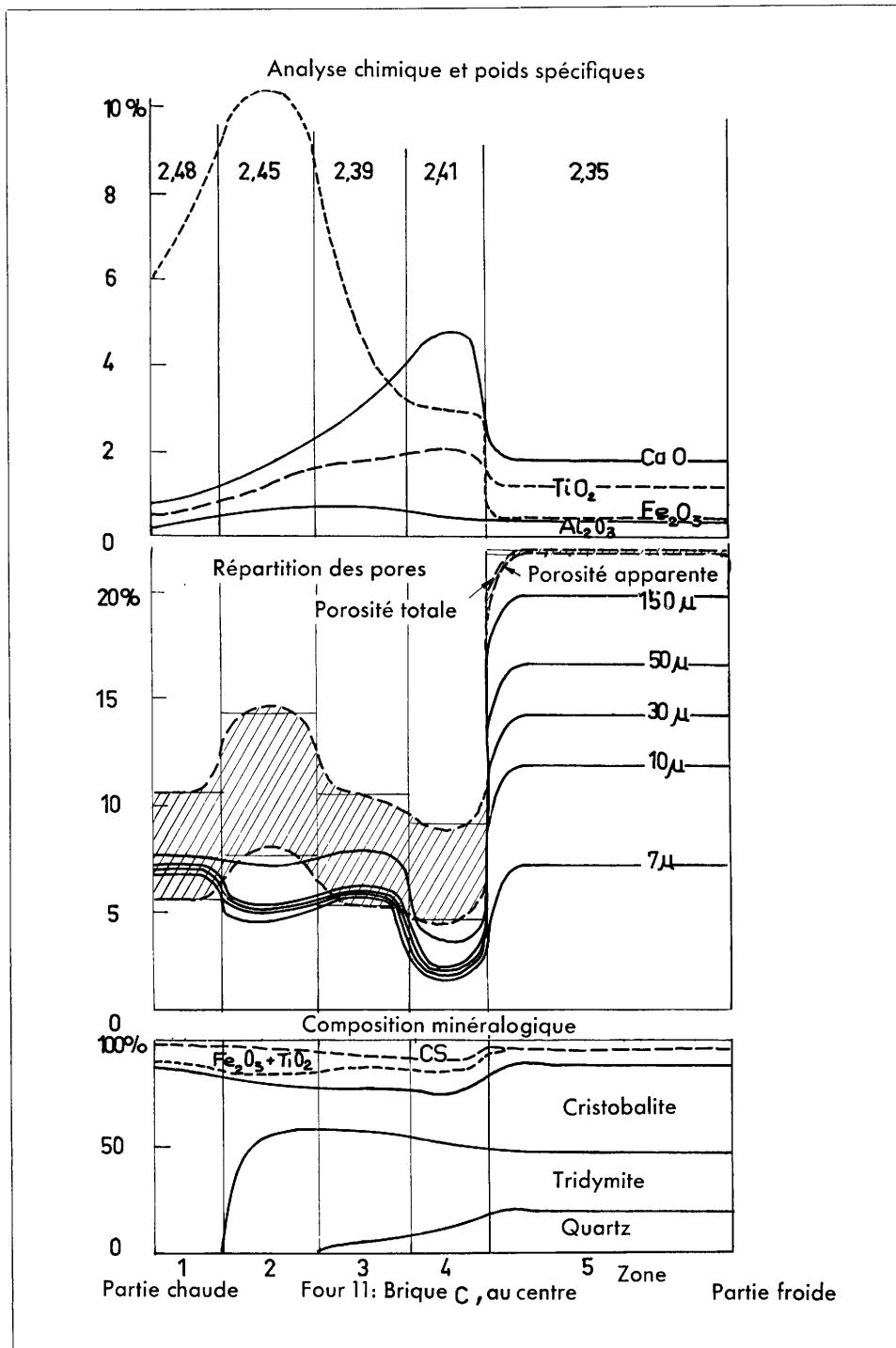


Fig. 40 — Structure en zones d'une brique de silice scorifiée.

transformation qui semble favorisée par la migration des fondants, la proportion de pores moyens et gros est fortement abaissée. Ceci indique que, dans les briques européennes étudiées, une transformation moyenne exerce une influence analogue à celle créée par une porosité initialement faible de la brique.

La teneur en cristobalite déterminée aux rayons X est d'environ 40 % à l'extrémité non transformée de la brique; elle s'abaisse considérablement au front de migration, reste constante longtemps même dans la zone tridymitique et s'élève ensuite rapidement à des valeurs d'environ 90 % du côté chaud,

c'est-à-dire dans la zone cristobalitique. La teneur en tridymite reste longtemps constante, s'élève légèrement dans ce qu'on appelle la zone tridymitique et s'abaisse enfin rapidement jusqu'à zéro au seuil de la zone cristobalitique. La teneur en quartz, qui doit généralement être attribuée à d'éventuels grains plus grossiers, subsiste souvent étonnamment loin de la zone tridymitique, ce qui a été également confirmé par des clichés pris sur lames minces. Il faut donc supposer que la proportion de cristobalite dans la zone tridymitique correspond à la quantité de quartz en grains et qu'elle est à peine modifiée par les fondants. Il faudrait encore signaler que la

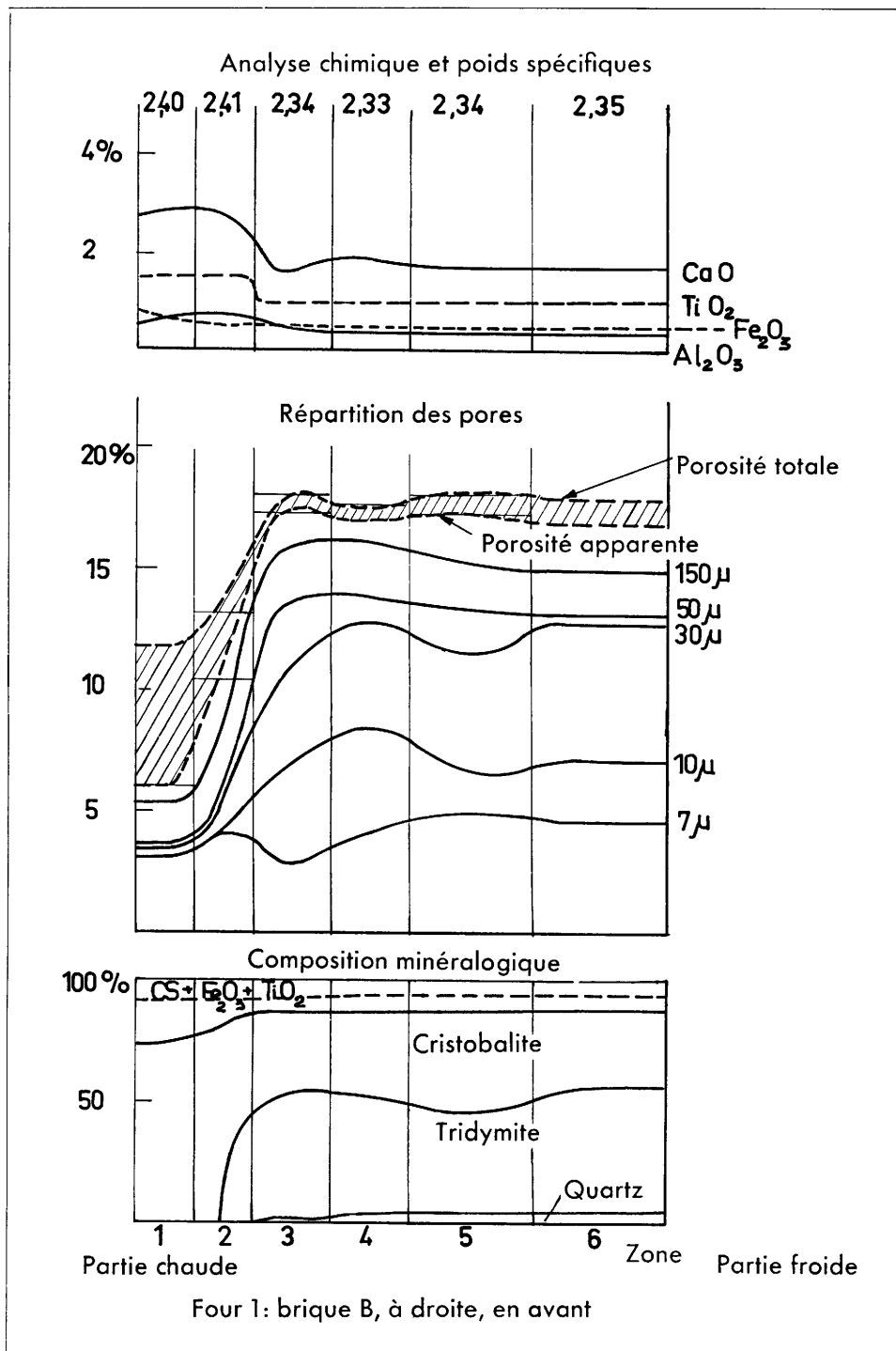


Fig. 41 — Structure en zones d'une brique de silice scorifiée.

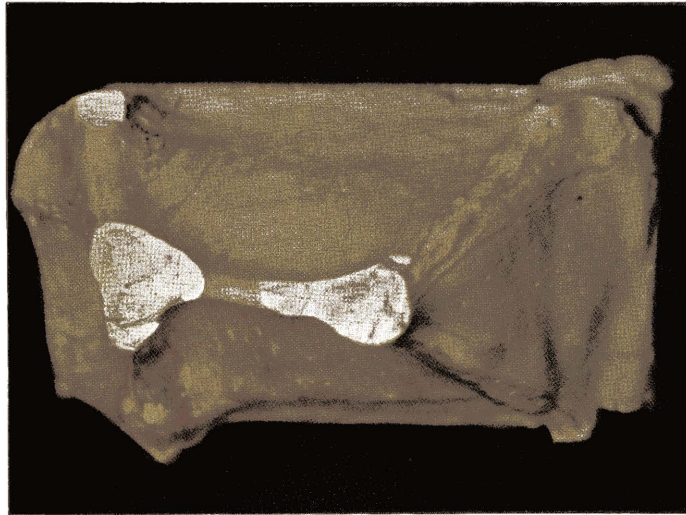


Photo F

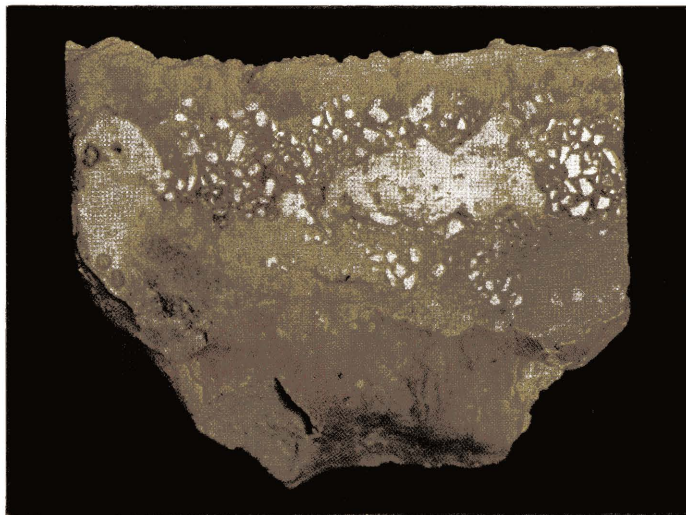


Photo G

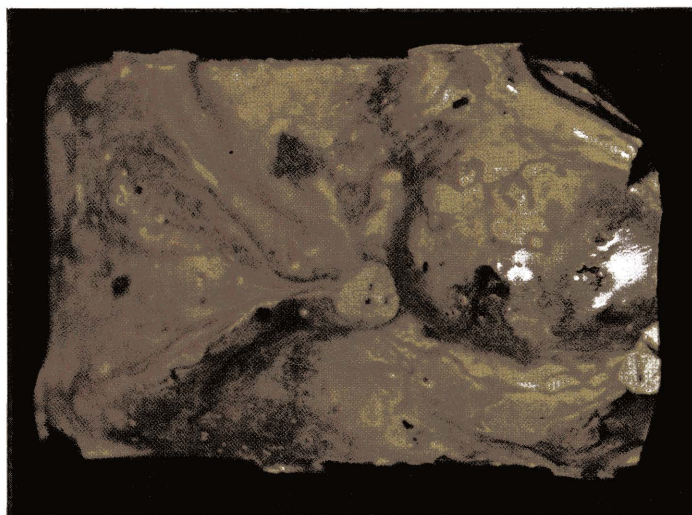


Photo H

Briques usées provenant du démontage du four

Photo F = Vue du dessous

Photo G = Vue de côté

Photo H = Vue du dessous

différence entre la somme des substances cristallines, déterminées aux rayons X, et la teneur en oxydes et wollastonite, calculée à partir de la composition chimique, mène souvent à une lacune qui s'explique par la disposition imprécise de la cristobalite et de la tridymite. De même, il n'est pas exclu que, du côté froid, l'évaluation aux rayons X donne une teneur en tridymite trop faible, parce que la phase liquide correspond à peu près au triple

de la teneur en fondants et que, lors du refroidissement, les cristaux de tridymite ont peut-être précipité incomplètement ou si finement qu'ils ne sont pas tous déterminés quantitativement.

Comparativement aux autres fours, les fours à allure chaude présentent un mode d'usure tout à fait différent (figures 41 et 42). Les courbes relatives à ces briques montrent que la teneur en oxyde de fer est faible et que, dans de nombreux cas, on

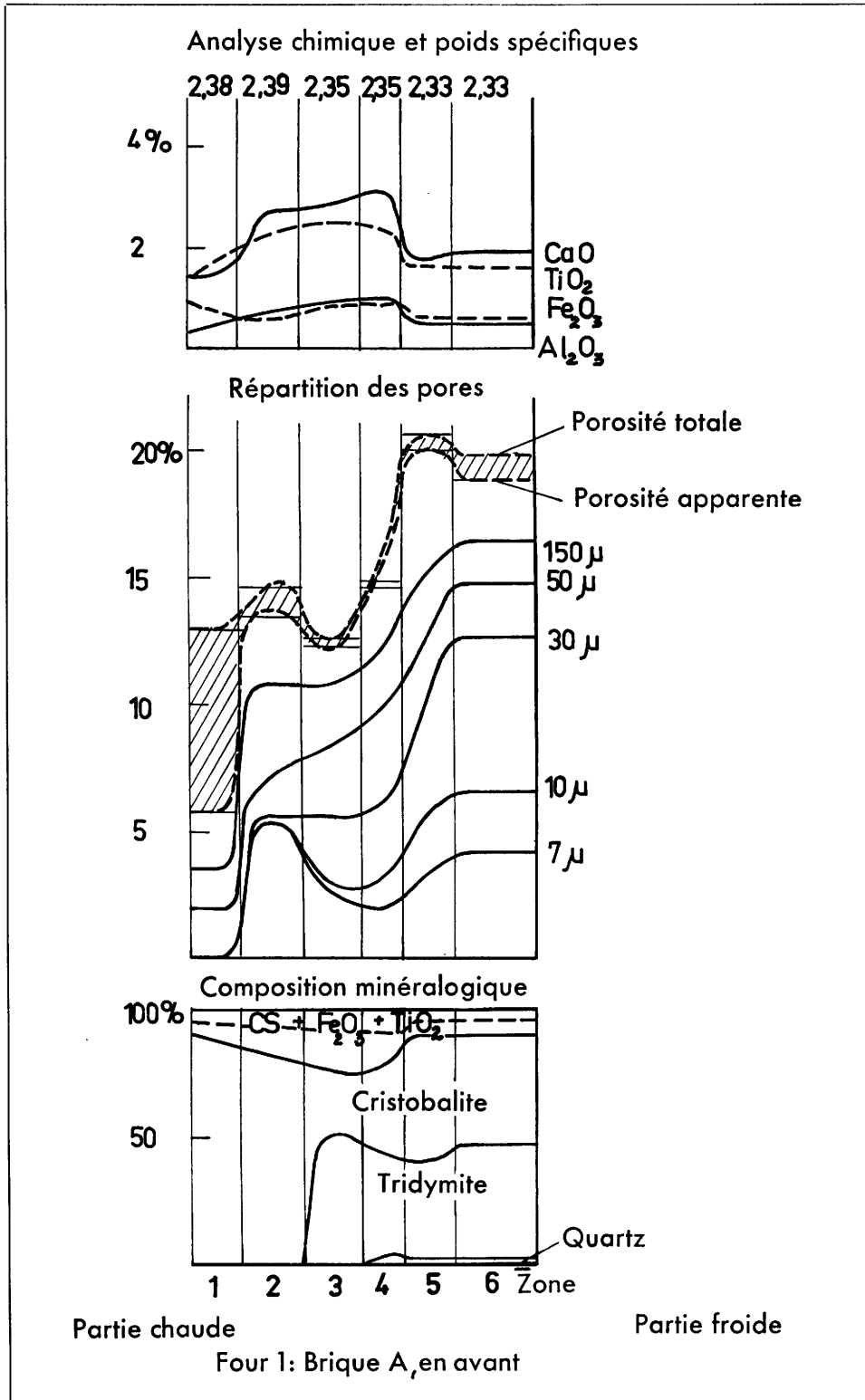


Fig. 42 — Structure en zones d'une brique de silice scorifiée.

n'observe qu'une migration incomplète des fondants. Les zones sont impossibles à distinguer, ou bien encore la couleur peut provoquer des erreurs de discernement. La séparation dans la zone cristoballitique se fait plus sûrement à l'aide de rayons X. Le point de référence (correspondant à la température de 1160°) du front de migration froid disparaît complètement ou presque. L'expérience que l'on a des autres fours montre qu'en général la teneur résiduelle en quartz donne une indication sur la répartition de la température du côté froid, parce que le quartz disparaît à 1300° environ par transformation. La répartition des pores est modifiée en premier lieu par la pénétration de la phase liquide. Ce n'est que dans la brique B que l'on voit que l'abaissement du poids spécifique de 2,35 à 2,33 diminue légèrement la porosité et aussi surtout la proportion de grands pores. Un phénomène très étonnant que l'on observe chaque fois consiste dans le fait que, même dans les briques bien transformées, le poids spécifique augmente vers le côté chaud, sans que cette augmentation puisse s'expliquer par une augmentation des fondants, en particulier de l'oxyde de fer. Le même phénomène a été également observé sur une face de tous les types de briques de silice chauffées à 1600°. Un autre rapport ⁽¹⁾ donnera une explication scientifique de ce phénomène.

Dans les fours à allure chaude, on voit très nettement que la brique fond plus rapidement que ne peut se déplacer le front de migration dans la brique. Un calcul a donné, dans la plupart des cas,

une vitesse de migration d'environ 3 mm par jour. Il semble donc important de vérifier la proportion d'éléments étrangers tels que CaO, TiO₂, etc., entraînée par le laitier et celle qui peut se déplacer vers la zone froide. L'analyse systématique par zone, en comparaison de l'usure par fusion et de la composition initiale de la brique, doit montrer lequel des deux processus l'emporte. Si les fondants présents dans la brique se déplacent complètement vers la zone froide, la quantité de ces fondants, calculée par rapport à la longueur initiale, devrait être inchangée après l'essai. Si les fondants étrangers à la brique — c'est-à-dire l'oxyde de fer et la chaux — sont absorbés par la brique et se déplacent également vers la zone froide, la teneur en fondants doit augmenter. L'autre cas extrême est celui dans lequel aucune quantité de fondants de la brique, ni de fondants absorbés n'a la possibilité de se déplacer vers la zone froide. Dans ce cas, la teneur totale en éléments étrangers doit être corrigée pour tenir compte de la partie de brique disparue par fusion. La plupart des cas pratiques se situent naturellement entre ces deux extrêmes, et l'on a établi pour deux fours à allure froide et trois fours à allure chaude la relation entre la variation de composition chimique, d'une part et le pourcentage de la brique disparue par fusion, d'autre part (tableau XXX). On a constaté dans tous les cas une nette augmentation de la teneur en oxyde de fer. Elle est généralement plus faible dans les fours à allure chaude, et dans certains cas on observe même une diminution. Dans les fours à allure très

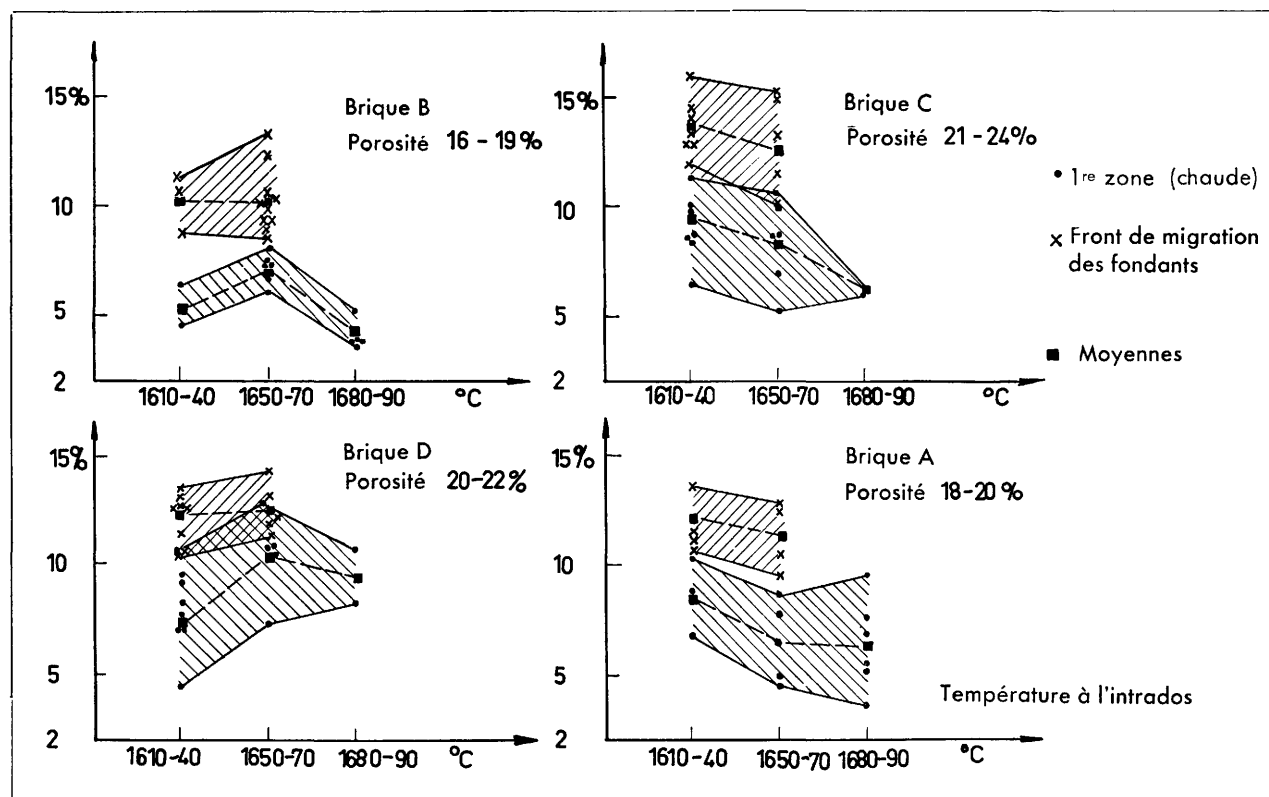


Fig. 43 — Perte en porosité des parties chaudes et froide de la zone de migration.

⁽¹⁾ K. Konopický et I. Patzak: Le phénomène de l'augmentation du poids spécifique par chauffage dans les briques de silice, «Ber. Deutsch. Keram. Ges.» (à paraître prochainement).

chaude, la teneur en CaO est du même ordre que la perte par fusion; et l'on observe aussi dans les fours à allure nettement froide que, en général, une partie de la chaux préexistante et absorbée est dissoute. En ce qui concerne la teneur en Al_2O_3 , on voit très nettement la différence dans les fours à allure froide qui, contrairement aux autres, montrent qu'une partie de l' Al_2O_3 a pu se déplacer. Les dispersions sont si grandes en ce qui concerne la teneur en TiO_2 qu'il faut au moins en tirer la conclusion qu'une grande partie du TiO_2 se dissout: ceci veut dire que la migration de TiO_2 est relativement lente vers la zone froide ou qu'une partie du TiO_2 fixée aux grains de quartzite ne migre pas, ainsi qu'on l'avait supposé auparavant.

Quantité vitrifiée — Composition du verre

On a essayé de déterminer quantitativement la pénétration des briques par les fondants, aussi bien du côté froid que du côté chaud, en fonction des allures auxquelles est soumis le four. On a rassemblé sur la figure 43 les valeurs pour les différents types de briques ainsi que la moyenne correspondante. On n'a pas pu indiquer les variations de composition au front de migration dans le cas des fours à

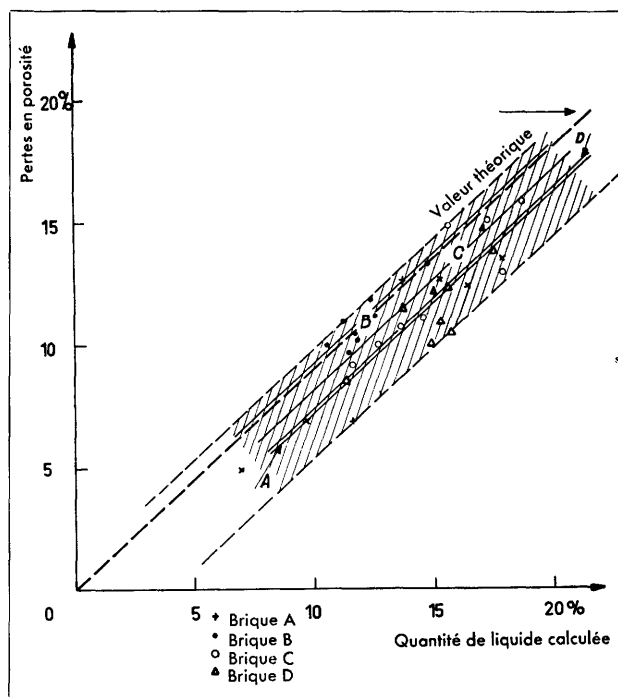


Fig. 44 — Pertes en porosité: proportion de liquide au front de la migration.

allure chaude, car, dans les briques de ces fours, le front de migration des fondants n'atteint pas la valeur limite correspondante de température, c'est-à-dire environ 1160° . La diminution des pores est nettement plus importante à la limite de migration des fondants que du côté chaud et, naturellement, est indépendante de la température du four. Par contre, la diminution de la porosité est plus faible dans la zone la plus chaude pour les fours à allure forcée.

Il est également possible de comparer la diminution de la porosité à la quantité de phase liquide qui s'est déplacée en se servant de l'analyse, de la densité apparente et du poids spécifique (figure 44). Il faut tenir compte, dans le calcul, du fait que l'on compare au poids spécifique moyen des transformations de SiO_2 le poids spécifique de la phase liquide, qui a été fixé à 2,2 en première approximation. Le rapport est toujours satisfaisant, compte tenu des multiples sources d'erreurs possibles, même si l'on voit que la brique D se place tout à fait différemment: ceci est peut-être imputable à l'absence de TiO_2 ou à une hypothèse fautive sur le poids spécifique par suite de la teneur plus élevée en CaO.

Pour toutes les briques étudiées, on a calculé la composition de la phase liquide au front de migration à partir des différences de composition chimique, de la densité apparente et du poids spécifique. On a présenté dans le tableau XXXI les valeurs trouvées pour les différents types de brique et pour les différents fours. On peut en tirer les conclusions suivantes: Dans les fours à allure chaude, le front de migration est atteint par une quantité de liquide moindre que dans les fours à allure froide, la différence entre les fours à allure moyenne et à allure froide n'étant naturellement pas très nette. La phase liquide a généralement une teneur en SiO_2 de 60%, ce qui confirme la formule de Rigby⁽¹⁾ selon laquelle la proportion de phase liquide est à peu près trois fois la quantité d'impuretés préexistantes et apportées (c'est-à-dire que la teneur en SiO_2 de la phase liquide est de $\frac{2}{3} = 66\%$). Il est à remarquer que les phases liquides, dans le cas des fours chauds, sont plus riches en SiO_2 que dans le cas des fours d'allure moyenne ou faible. En outre, les valeurs de la teneur en SiO_2 de la phase liquide sont de 50% pour la brique A. Il semble que, dans la phase liquide, TiO_2 remplace SiO_2 . La teneur en CaO est généralement de 20%; on trouve habituellement une proportion plus faible dans les phases liquides des briques des fours à allure chaude, ce qui correspond à une teneur plus élevée en SiO_2 . La teneur en TiO_2 dans la phase liquide est de 7%; elle atteint 9% seulement dans la brique A, ce qui n'est pas beaucoup plus élevé; bien entendu, la phase liquide ne contient pas de TiO_2 pour la brique D, puisqu'il n'y en avait pas dans la brique elle-même. Dans les phases liquides des briques des fours à allure chaude, la teneur en Fe_2O_3 est nettement plus faible que dans celles des briques de fours à allure moyenne ou faible. On est étonné de voir qu'elle est maximum dans la brique C et minimum dans la brique B, sans qu'on puisse trouver une explication à ce fait. La teneur en Al_2O_3 est manifestement influencée par de très nombreux facteurs. Il est également possible que, dans les importantes dispersions des valeurs trouvées, interviennent les erreurs de dosage de l' Al_2O_3 , car il s'agit là d'un dosage par différence.

Mais les différentes caractéristiques en zones des divers types de briques ne doivent pas être rattachées telles quelles à la tenue en service. En effet, une série de phénomènes ne peut être reliée qu'indirectement, tout au plus, aux caractéristiques et à la composition chimique des différentes zones.

(1) G. R. Rigby, R. P. White, H. Booth et A. T. Green: «Trans. Brit. Ceram. Soc.», 45 (1946), pp. 69 à 109.

Processus d'usure des zones

Les essais effectués jusqu'à présent montrent que les caractéristiques chimiques et physiques suivantes de la brique neuve agissent sur le processus de l'usure: la teneur en alumine, la porosité, le poids spécifique et la teneur en TiO_2 . On a essayé d'étudier ces quatre facteurs dans chacune des zones afin de délimiter leur influence sur les processus d'usure. On a comparé sur les figures 45 et 46 la composition chimique de la zone cristobalitique (première zone), de la zone chaude tridymitique (deuxième zone) et de la zone froide (front de migration). Les moyennes de la teneur en Al_2O_3 de la zone cristobalitique ne font apparaître aucune différence entre, d'une part, les trois briques de bonne qualité et, d'autre part, la mauvaise brique A. Il en est de même pour la teneur en CaO, tandis que la teneur en TiO_2 dépend encore nettement de leur teneur initiale en TiO_2 dans la zone chaude. Dans la brique A, la teneur en Fe_2O_3 de la zone cristobali-

tique est nettement plus faible; mais nous reviendrons encore plus loin là-dessus. Dans la zone tridymitique voisine de la zone cristobalitique (dans laquelle commencent parfois les phénomènes de cavitations par fusion donnant lieu à une sorte d'attaque en creux du côté chaud), la brique A se différencie généralement par sa teneur plus élevée en Al_2O_3 ; par contre, les teneurs en CaO et Fe_2O_3 ne sont pas caractéristiques et la teneur en TiO_2 évolue en fonction de sa teneur initiale dans la brique. On obtient les mêmes relations — naturellement un peu moins atténuées — en comparant la composition au front de migration, sauf en ce qui concerne les teneurs en CaO, qui sont nettement maxima pour la brique D et minima pour la brique A. Étant donné que, dans cette zone, la température est de 1200° en moyenne, elle ne peut influencer directement le processus d'usure.

On a déjà indiqué plus haut que la quantité d'oxyde de fer et de chaux à la surface de la brique

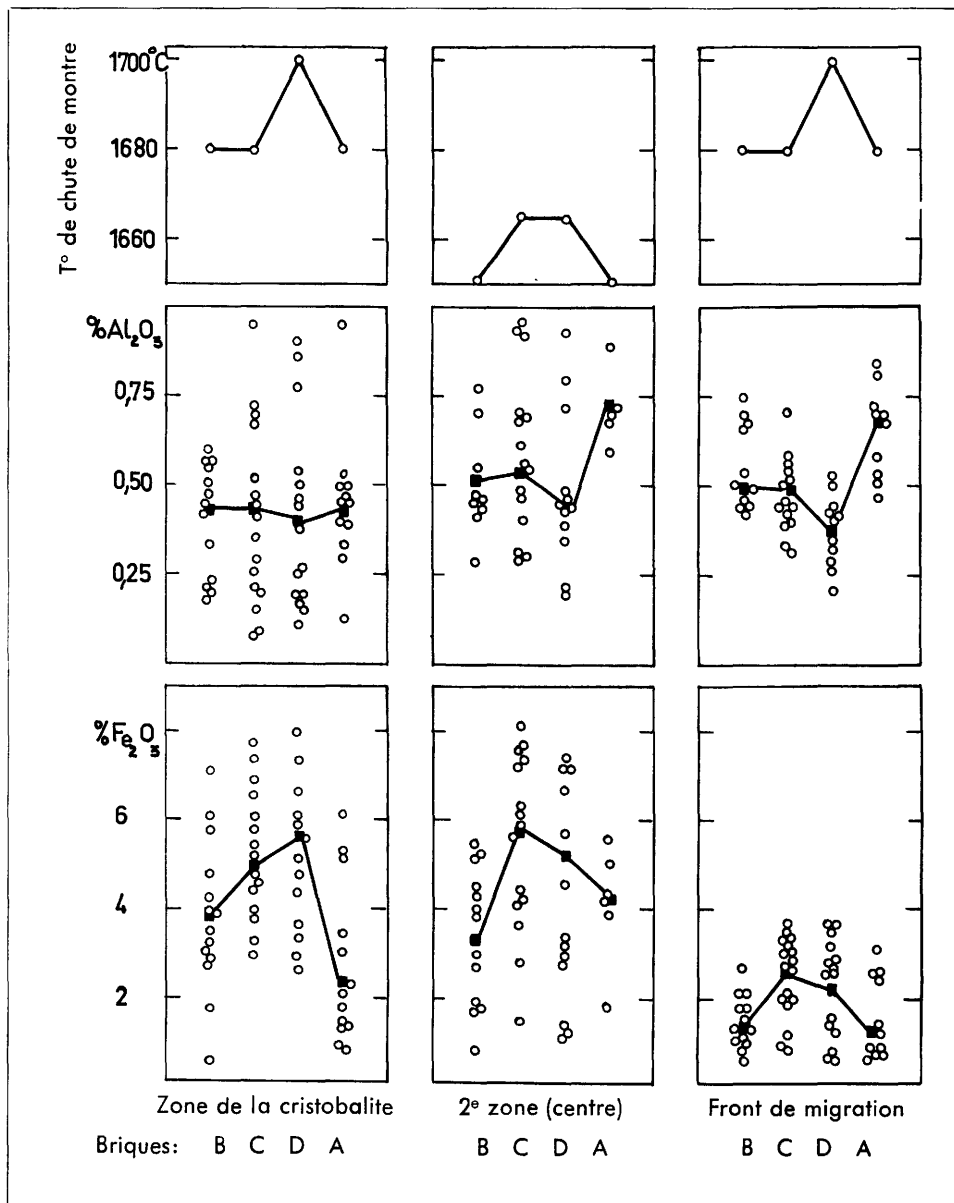


Fig. 45 — Composition chimique et températures de chute de montres des différentes zones. Moyennes des valeurs les plus fréquentes.

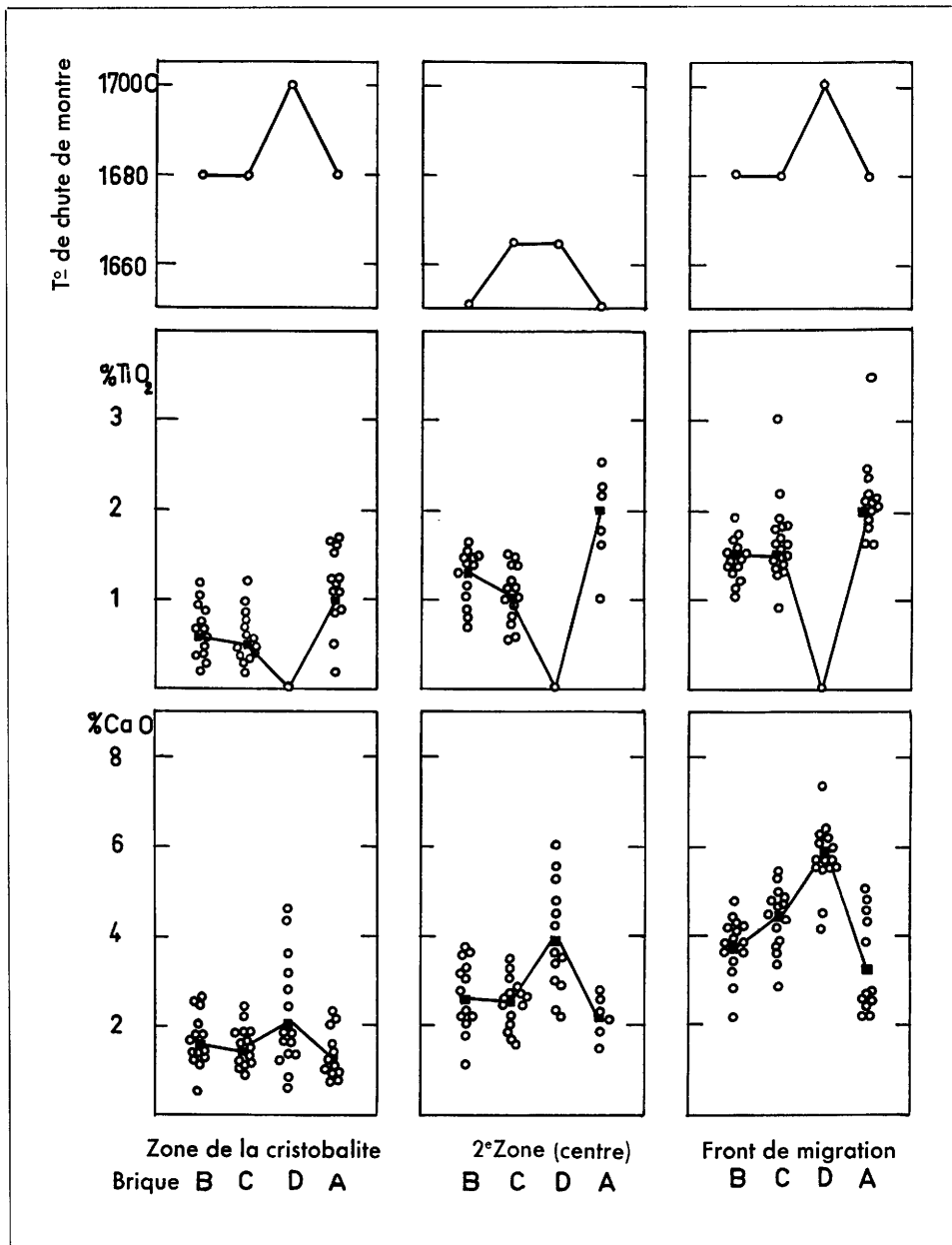


Fig. 46 — Composition chimique et températures de chute de montres des différentes zones. Moyennes des valeurs les plus fréquentes.

est liée à son usure et que, plus la température du four est élevée, plus la teneur en oxyde de fer est basse dans la zone la plus chaude. Ceci tient au fait que, à haute température, la phase liquide silicatée, riche en oxyde de fer, devient trop fluide. Cette opinion a été confirmée par l'aspect homogène que l'on peut observer après l'arrêt du four. Suivant l'atmosphère et la température du four, et apparemment aussi en fonction de la concentration des poussières de chaux, les briques présentent une couleur allant du jaune clair à une teinte presque noire (voir photographies en couleurs, page 77). On a pu observer dans certains cas que la majeure partie des briques de voûte étaient recouvertes d'un émail brun et que la couleur était plus foncée dans les parties froides, ce qui concorde bien avec les différents teneurs en oxyde de fer des briques usagées.

L'alumine ne joue aucun rôle dans cette représentation du processus d'usure par l'oxyde de fer et la chaux à haute température. Comme les études statistiques des différentes zones montrent que les différences de teneur en alumine ne se manifestent pas dans la zone la plus chaude, mais dans la seconde zone, on a également étudié la résistance pyroscopique de la substance pulvérisée de cette seconde zone. On a trouvé (ce qui est une confirmation) qu'elle est inférieure de une à une et demie montre à celle de la zone la plus chaude, et d'environ deux montres à celle de la zone froide.

Il faut donc se représenter le processus d'usure comme se déroulant en deux phases: l'usure est déterminée dans la zone chaude par l'oxyde de fer et la chaux, ainsi que par la température maximum du four. De plus, l'enrichissement en alumine dans la zone voisine peut donner la possibilité, si l'usure se poursuit, de porter cette zone en fusion et aug-

mente ainsi très souvent, et d'une façon déterminante, l'usure. Il convient naturellement de ne pas oublier que plusieurs facteurs influencent ce processus, ce qui explique d'ailleurs la grande dispersion des différentes valeurs. C'est ainsi que, comme on l'a dit plus haut, il ne se produit dans les fours à allure chaude qu'une migration minime et qu'un très faible enrichissement en Al_2O_3 dans la deuxième zone. Dans ces fours, la résistance pyroscopique, c'est-à-dire la teneur en Al_2O_3 considérée

la température du four diminue; mais, d'autre part, la teneur maximum en oxyde de fer s'élève en même temps que la porosité pour une température constante dans le four. Une porosité élevée entraîne par conséquent une plus forte absorption d'oxyde de fer, d'où fusion plus rapide.

2 — Influence de la teneur en TiO_2

La teneur en TiO_2 influence également la teneur maximum en Fe_2O_3 (figure 48). La teneur en Fe_2O_3

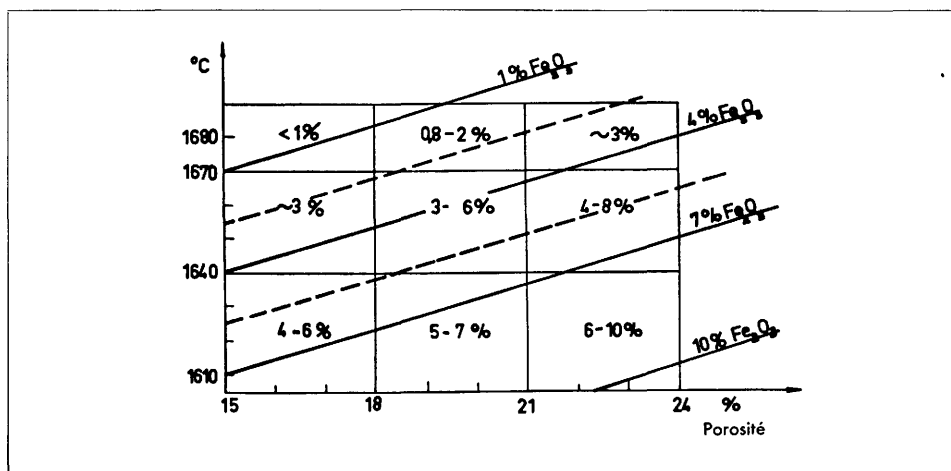


Fig. 47 — Teneur maximum en Fe_2O_3 : Porosité : température à l'intrados.

de ce point de vue, exerce une influence décisive sur la tenue. Dans les fours à allure très froide, et naturellement pour une teneur pas trop élevée en Al_2O_3 , cette dernière se rassemble presque uniquement du côté froid de la brique et l'on n'observe qu'un très faible enrichissement en Al_2O_3 dans la deuxième zone, qui est en danger. Outre ces deux phénomènes extrêmes, le gradient de température à l'intérieur de la brique et le cycle thermique du four doivent jouer un rôle. En effet, la chaleur pénètre d'autant plus dans la brique que la durée de chargement du four est plus longue; ceci veut dire que, dans les grands fours, la température critique de fluage de la deuxième couche se maintiendra plus longtemps et provoquera en conséquence une usure plus forte, comparativement à ce qui se passe dans les briques des fours plus petits.

Facteurs de la tenue des briques

Étant donné qu'il faut utiliser les résultats des essais pour apprécier et améliorer les briques de silice telles qu'elles se présentent à l'état de livraison, on a essayé d'établir une corrélation entre les facteurs d'influence caractéristiques des différentes zones et les résultats obtenus, à l'origine, sur la brique.

1 — Influence de la porosité

Afin de déterminer l'influence de la porosité, on a représenté la teneur maximum en Fe_2O_3 (qui ne se trouve pas toujours au point le plus chaud) en fonction de la porosité initiale de la brique et de la température du four (figure 47). Cette figure montre très nettement que, pour une porosité identique, la teneur maximum en oxyde de fer augmente lorsque

est abaissée par TiO_2 , selon la conduite du four. Ce freinage de la pénétration de l'oxyde de fer avait déjà été observé auparavant⁽¹⁾ et doit probablement être attribué à une modification de la tension superficielle de la cristobalite qui peut absorber un peu de TiO_2 en solution solide.

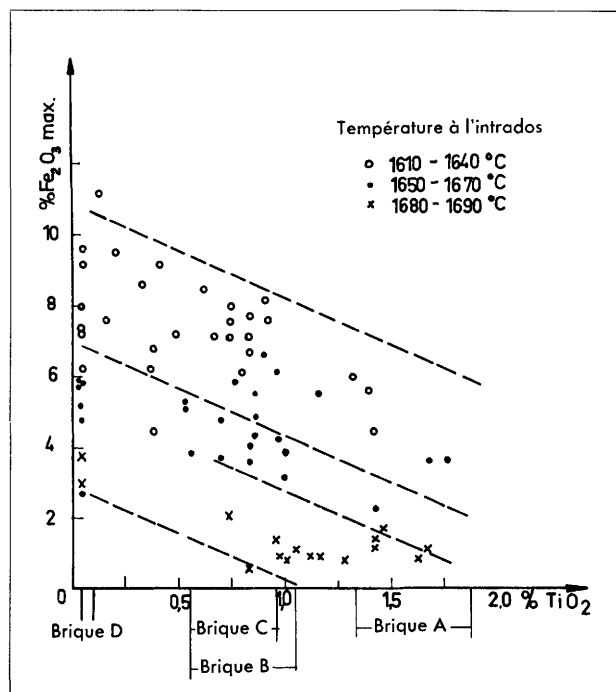


Fig. 48 — Teneurs maximum en Fe_2O_3 en fonction de la teneur en TiO_2 .

(1) K. Konopicky: «Stahl und Eisen», 74 (1954), pp. 1402 à 1413.

3 — Influence du degré de transformation

Il est très difficile d'élucider la question de savoir si une transformation incomplète de la brique de silice peut améliorer sa tenue en service. Les essais précédemment effectués dans des aciéries allemandes tendent à prouver qu'une transformation moyenne n'est absolument pas nocive et qu'elle est

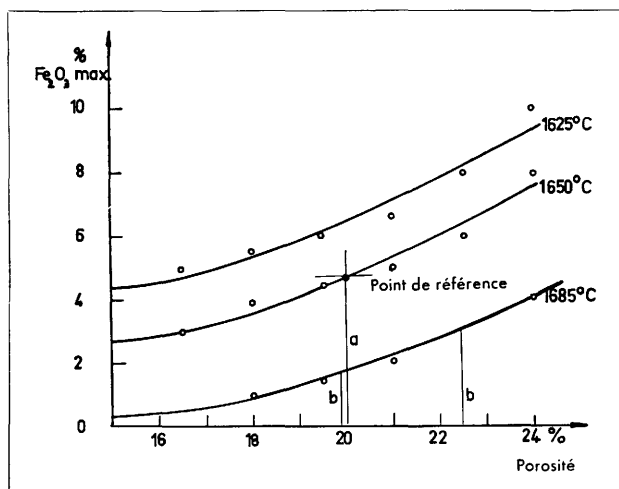


Fig. 49 — Température à l'intrados du four: teneur maximum en Fe_2O_3 : Porosité

peut-être même souhaitable, car, par suite de l'augmentation de volume pendant le chauffage, une partie de la transformation est absorbée par les pores. Afin de pouvoir comparer la grande quantité de fours différents et de conditions différentes de marche de ceux-ci, on a établi la figure 47 et représenté la teneur maximum en Fe_2O_3 en fonction de la porosité pour des fours à allures chaude, moyenne et froide (figure 49). On peut alors convertir toutes les valeurs à une valeur standard (20% de porosité et 4,5% d'oxyde de fer) conforme au rapport correspondant pour les fours à allure moyenne. On a indiqué sur la figure 50 les valeurs moyennes obtenues et on les a comparées à une droite supposée représenter l'augmentation de leur teneur escomptée en oxyde de fer, par suite de l'augmentation de la porosité lors du gonflement ultérieur de la brique. Les valeurs et relations obtenues confirment que, jusqu'à un poids spécifique de 2,39, les briques de silice ont un comportement meilleur que ne le faisaient escompter les valeurs de la porosité après cuisson (ceci n'étant valable que pour les briques de silice fabriquées à partir de matières premières provenant d'Europe continentale). Des briques ayant un poids spécifique supérieur à 2,40 ne présentent pas une meilleure résistance à l'usure.

Afin d'avoir une idée sur la façon dont varie la composition des différentes zones, la teneur en Fe_2O_3 a été convertie en FeO et portée avec CaO sur le diagramme ternaire correspondant. Mais, comme il existe, à côté de la phase liquide qui se déplace, un squelette permanent de SiO_2 , on a calculé à première vue 87% de SiO_2 dans ce squelette (figure 51). Les résultats donnés par ce diagramme sont remarquables: étant donné que, comme

on l'a dit précédemment, la teneur en Fe_2O_3 diminue sur la face interne et chaude où se font les réactions lorsque la température du four augmente, le rapport CaO/FeO passe de $1/4$ environ (par suite de l'attaque supposée moyenne par les poussières) à une valeur de plus en plus élevée. Dans la zone tridymitique, la composition de la phase liquide se situe à environ 55% de SiO_2 , et évolue constamment, en partant d'un pourcentage élevé en FeO pour aller à un pourcentage élevé en CaO à l'extrémité du front de migration. Ces résultats sont en accord avec le calcul de la proportion de phase liquide dans le front de migration. La variation proprement dite de la composition de la phase liquide est peut-être imputable à l'absorption de silicate de fer à environ 50% SiO_2 et 50% ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) dans la tridymite, de même que dans les processus chromatographiques (1).

Usure, température du four, qualité des briques

La grande quantité de chiffres dont on dispose, ainsi que les conclusions tirées dans la dernière partie de l'étude permettent maintenant une interprétation plus précise du processus de l'usure.

En comparant les différents fours, on est étonné de voir que les diverses qualités de briques ne présentent pas toujours la même tenue relative en service.

On a représenté sur les diagrammes suivants (figures 52 à 62) la progression de l'usure des différentes bandes d'essai pendant la campagne du

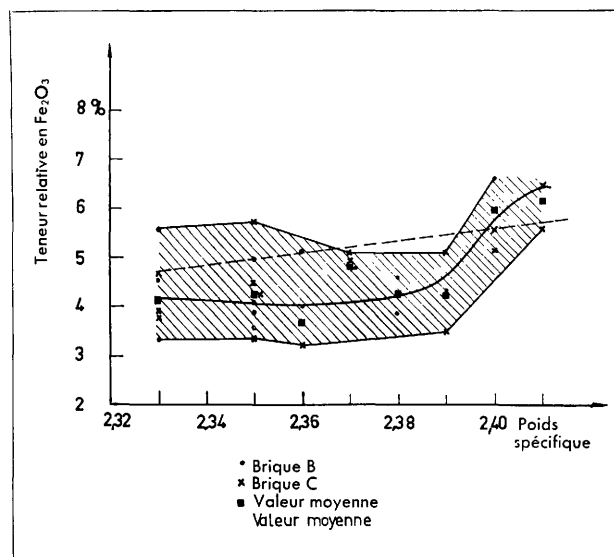


Fig. 50 — Extrapolation de la teneur max. en Fe_2O_3 pour 1650 degrés cent. et pour une porosité de 20%

four. Dans les fours à allure poussée, il apparaît non seulement une usure plus importante, mais aussi une différenciation plus marquée des qualités de briques entre elles, alors que, par ailleurs, une différenciation n'est pas possible dans les fours à allure froide.

C'est pourquoi, l'on a essayé de grouper les fours d'après leurs conditions d'allure (allure poussée,

(1) K. Konopicky: «Stahl und Eisen», 74 (1954), pp. 1402—1413.

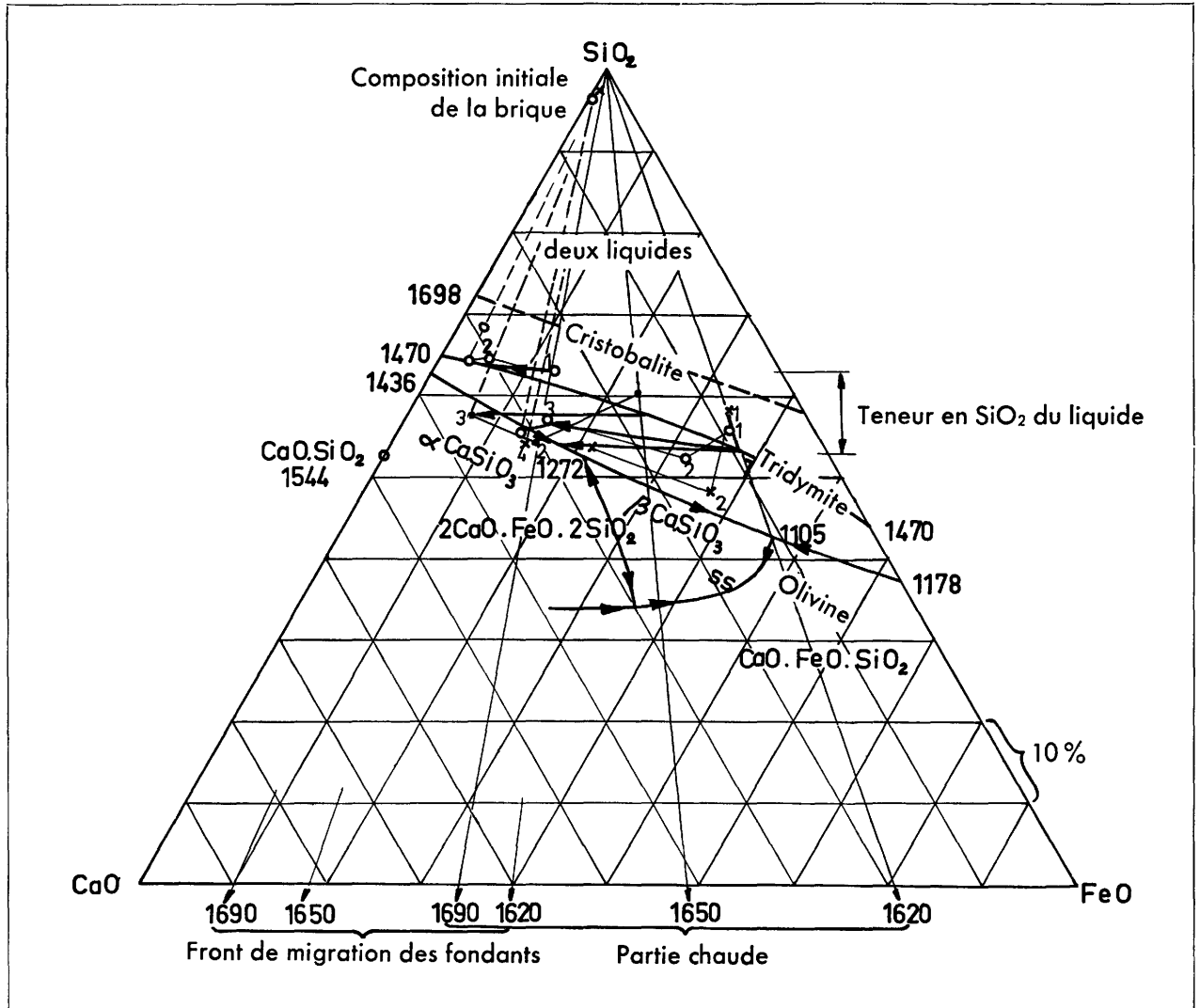


Fig. 51 — Variation de la quantité de liquide dans les différentes zones.

modérée et lente), afin de pouvoir en tirer d'autres conclusions. On avait pensé classer les fours d'après la température de l'intrados de la voûte, mais il était impossible d'établir ainsi une classification précise. C'est pourquoi, les fours ont été classés d'après la teneur maximum en Fe_2O_3 des briques usagées car, d'après ce qui a été dit plus haut, cette

dernière est caractéristique de l'allure imposée au four.

On a indiqué dans le tableau XXXII (p. 69) la tenue relative des briques (tenue moyenne) dans l'ordre des allures décroissantes des allures des fours. On voit que les fours à allure lente ne font apparaître aucune différence entre les diverses qualités de

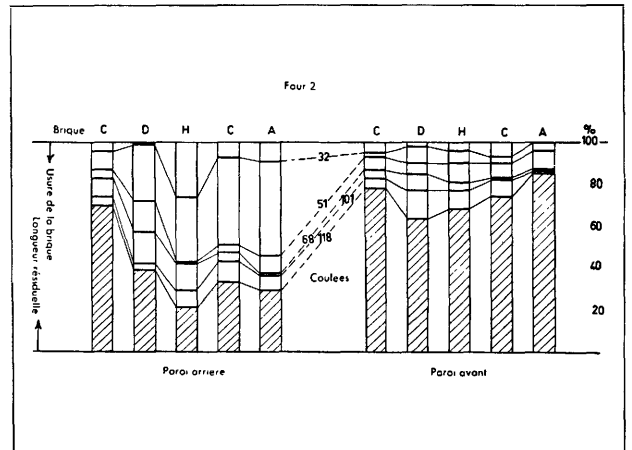
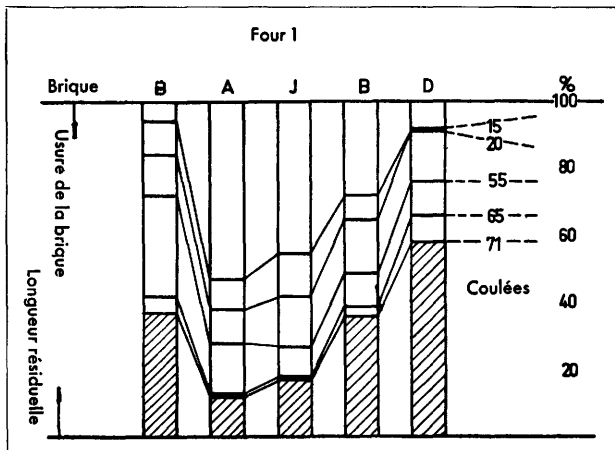


Fig. 52 et 53 — Usure des bandes d'essai dans les fours 1 et 2.

briques, tandis que les fours à allure poussée mettent en évidence de nettes différences entre celles-ci, en particulier suivant la teneur en alumine et la porosité. C'est ainsi que des briques ayant une teneur en Al_2O_3 de 0,6% présentent une tenue tout à fait mauvaise, tandis que pour les briques à plus basse teneur en Al_2O_3 une teneur relativement plus forte en alumine peut être compensée par une plus faible porosité (voir figure 63).

On peut encore établir une appréciation en faisant la comparaison avec la «brique habituelle de l'usine»

qui a été placée dans la partie de la voûte au-dessus du trou de coulée où la fatigue est généralement maximum. Malgré cela, la brique E présentait le meilleur comportement pour les trois fours 14, 15 et 16. Par ailleurs, la brique J, habituellement utilisée dans le four 1, se classait entre la brique B et la brique A.

On a indiqué sur la figure 63 les domaines des différentes qualités de briques en ce qui concerne l'alumine et la porosité. Dans les fours à allure poussée, le comportement à peu près semblable des

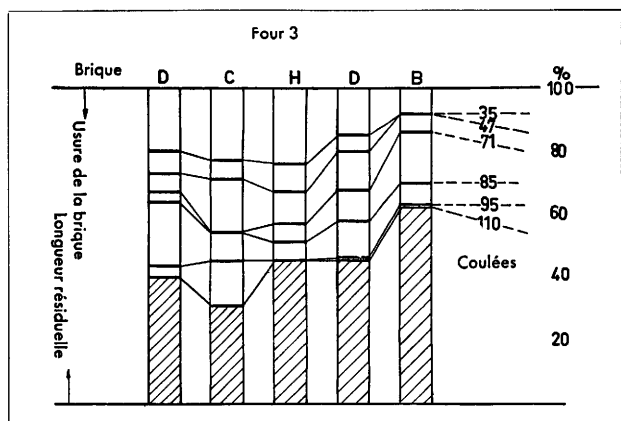


Fig. 54

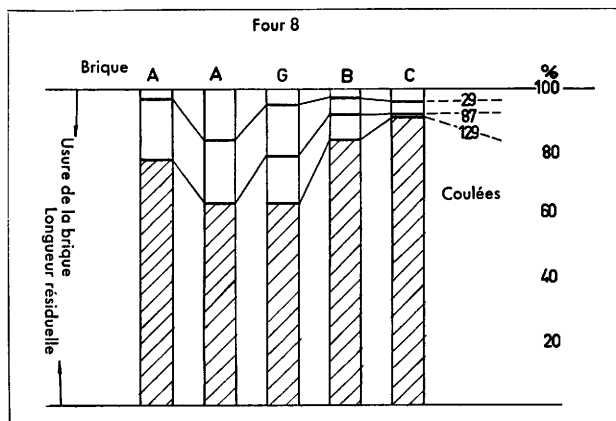


Fig. 57

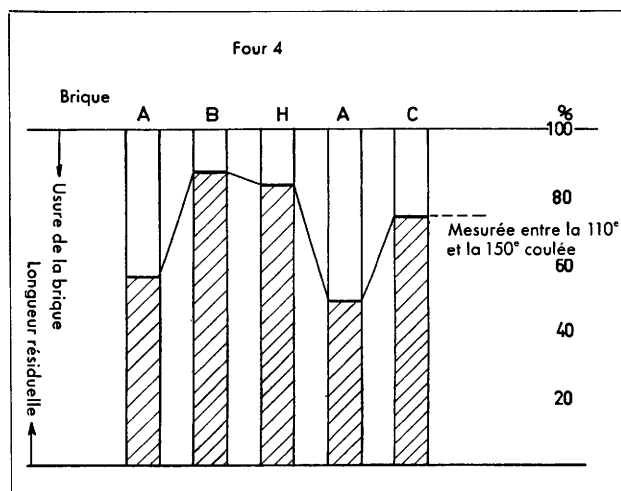


Fig. 55

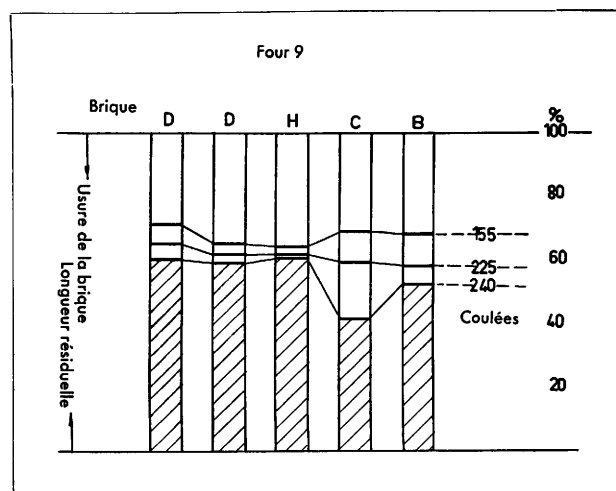


Fig. 58

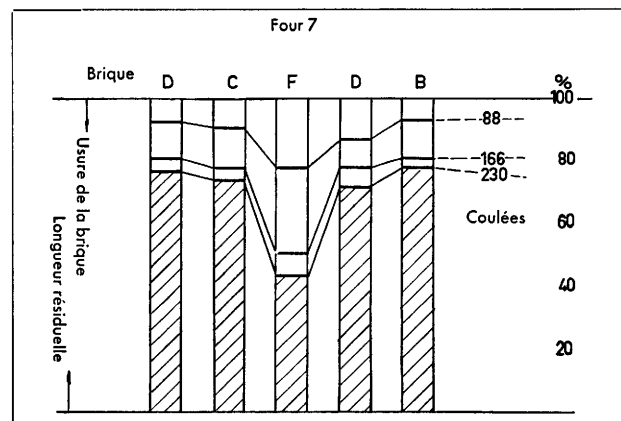


Fig. 56

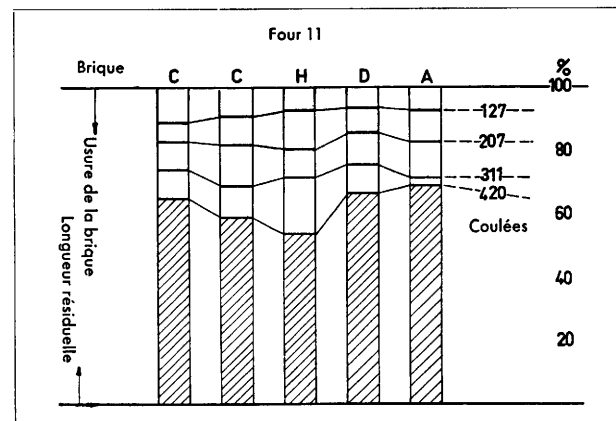


Fig. 59

Fig. 54 à 59 — Usure des bandes dans les fours 3, 4, 7, 8, 9 et 11.

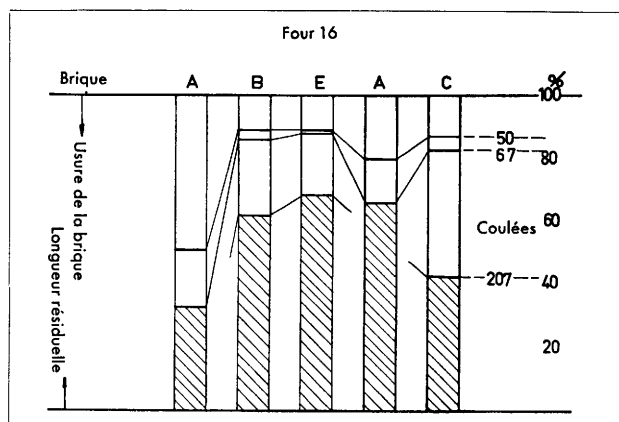
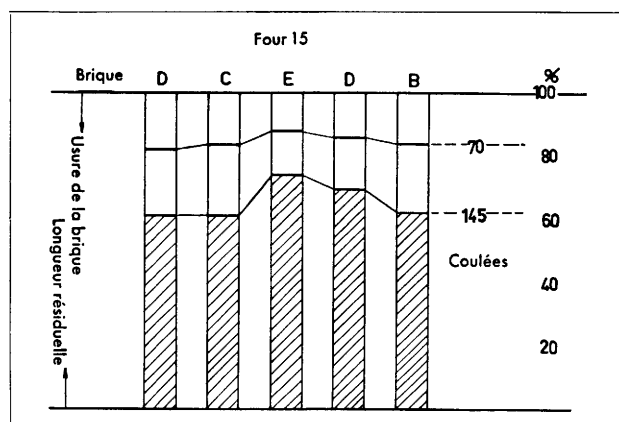
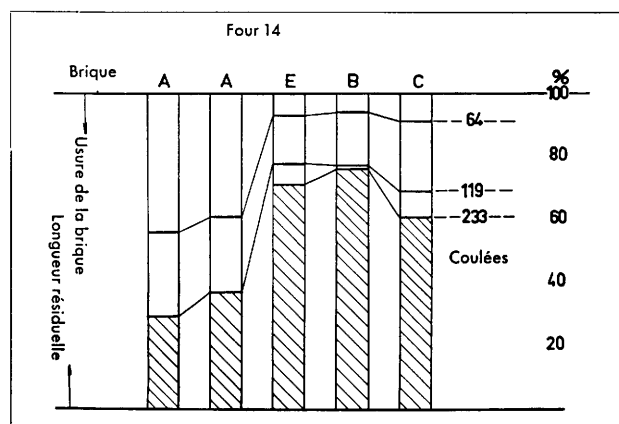


Fig. 60 à 62 — Usure des bandes dans les fours 14, 15 et 16.

briques D, B et C est représenté par une droite correspondant, dans une large mesure, à l'indice de qualité moyen. Dans les fours à allure froide, par contre, la droite de jonction se rapproche beaucoup plus de l'horizontale, c'est-à-dire que l'influence nocive de l'alumine est ici considérablement compensée par la porosité. Ceci explique également les différentes opinions formulées dans la littérature (surtout depuis quelques temps) à propos des rapports existant entre la teneur en Al_2O_3 et la porosité.

D'après ces diagrammes, une teneur en TiO_2 supérieure à 1% environ semble avoir une action aussi néfaste que celle de l' Al_2O_3 ; et ceci est encore plus net dans les fours à allure chaude.

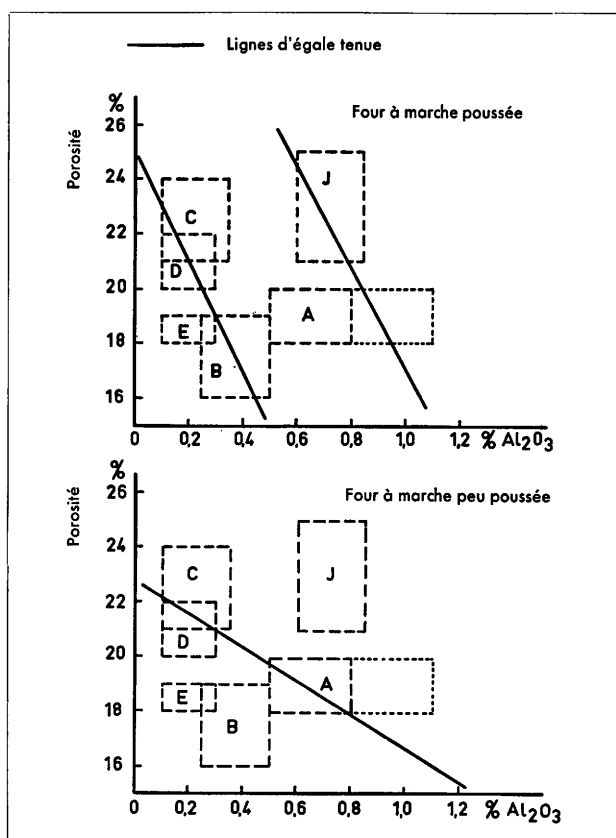


Fig. 63 — Comparaison de la tenue des briques d'essai.

Dans les fours à allure chaude, on a souvent pu observer que la brique B présentait au début de la campagne du four une usure supérieure à celle de la brique C, alors que cette usure était moindre à la fin de la campagne. Étant donné que la plupart des fours à allure chaude ont été refroidis (tantôt au début, tantôt après l'apparition de taches rouges), ce phénomène peut être attribué à des différences dans la conductibilité thermique qui intervient sur l'intensité du refroidissement à la paroi interne chaude. Des essais en vue de déterminer la conductibilité thermique des différentes zones des briques, pendant la campagne du four, ont donné les résultats suivants:

On a pu se rendre compte d'une influence secondaire de la porosité: jusqu'à 1 200°, la conductibilité thermique croît avec la densité apparente; au-dessus de cette température, la conductibilité thermique d'une brique dense est plus faible que celle d'une brique poreuse. C'est pourquoi, dans le cas d'un refroidissement systématique d'une voûte, et toutes conditions égales par ailleurs, on donnera la préférence aux briques ayant la plus faible porosité.

TABLEAU XXXIII

Type de brique	Conductibilité thermique (kcal/m ² /h/°C)		
	Zone inaltérée	Zone tridymitique noire et brune	Zone cristobalitique grise
B	1,6	3,0	1,7
C	1,35	3,25	après une augmentation, chute à 1,7

Conclusions

Des briques de silice pour voûtes de fours Martin, de composition différente (valeurs moyennes pour le poids spécifique: 2,32 à 2,39 gr/cm³; pour Al₂O₃ : 0,17 à 0,57 %; pour TiO₂ : 0,03 à 1,41 %; pour la porosité : 16,5 à 22,7 %), ont été essayées dans 13 fours Martin différents. Bien qu'il s'agisse de briques de silice utilisées régulièrement, et parfois en très grandes quantités, dans la construction de ces voûtes, on a constaté entre elles des différences de tenues. Ces différences étaient d'autant plus marquées que l'allure du four était plus chaude, tandis qu'elles devenaient pratiquement nulles dans les fours pour lesquels la température de l'intrados de la voûte était relativement basse.

La production horaire du four et la température maximum de la voûte n'évoluent pas parallèlement. Le point de la voûte où la température est maximum se déplace parfois au cours de la campagne du four; malgré cela, les résultats obtenus sont absolument caractéristiques. La formation dans la flamme de tourbillons localisés provoque dans la voûte des dégradations également localisées plus importantes.

I a) Les types de briques utilisés ont pu être montés sans difficulté avec ou sans mortier. Les pertes par rayonnement ont été plus importantes lorsque les voûtes ont été construites sans joint de mortier.

Une arête légèrement chanfreinée (dans le but de reconnaître plus facilement le sens de la conicité de la brique) a facilité le montage de la voûte.

Malgré les différences de poids spécifique entre les briques, entraînant ultérieurement des différences de dilatation dans des bandes voisines, aucune difficulté, due à ce fait, ne s'est manifestée au cours des essais. Pratiquement, on n'a même pas trouvé de grande différence en ce qui concerne la dilatation. Il semble toutefois qu'un joint de 0,75 % soit nécessaire pour des briques bien transformées et un joint de 1,1 % pour des briques moyennement transformées.

I b) Des briques de silice ayant un poids spécifique allant jusqu'à 2,40, c'est-à-dire peu transformées, n'ont pas une tenue plus mauvaise (étant entendu qu'elles émanent de matières premières en provenance d'Europe continentale) que des briques complètement transformées (poids spécifique 2,33); la plupart du temps, leur tenue est même meilleure.

II a) Le refroidissement par ventilateurs intervient d'une façon décisive dans la répartition de la température à l'intérieur de la voûte et par conséquent aussi dans l'usure et la tenue des briques en service.

Une grande conductibilité thermique est souhaitable, dans le but d'obtenir un gradient de température élevé à l'intérieur de la voûte, surtout lorsque celle-ci doit être refroidie. Généralement, les briques les moins poreuses ont une conductibilité thermique plus élevée, ce qui est favorable pour le refroidissement, en particulier au cours de la seconde moitié de la campagne du four.

II b) Il est souhaitable que la porosité soit faible, bien que l'influence de la porosité soit peu importante, comparativement aux autres caractéristiques des briques de

silice, dans le cas des fours à marche poussée. Il faut essayer d'arriver à une porosité inférieure à 20 %, ce qui est difficile, malgré le choix d'une granulométrie appropriée à une gamme de matières premières, en particulier dans le cas de matières premières pauvres en fondant.

III a) Une teneur en Al_2O_3 aussi faible que possible est souhaitable. Elle doit être inférieure à 0,5 % même, si possible, à 0,3 %, pour les fours marchant à de fortes allures. Dans le cas de faibles allures, les différences de tenue s'amenuisent pour une teneur en Al_2O_3 pouvant aller jusqu'à 0,7 % environ; dans ce cas, en effet, une faible porosité peut compenser la mauvaise influence d'une teneur élevée en Al_2O_3 . La répartition de l'alumine dans les matières premières doit être homogène; en particulier, elle ne doit pas être concentrée dans les fines. Ceci explique également pourquoi les formules de qualité établies entre-temps, et qui lient la teneur en Al_2O_3 avec la porosité, font apparaître des rapports de valeur différente. Si l'on veut tenir compte de tous les facteurs, il faut également faire intervenir dans ces formules de qualité (indice de qualité) l'influence positive d'une transformation incomplète (différence entre le poids spécifique trouvé et la valeur de 2,32).

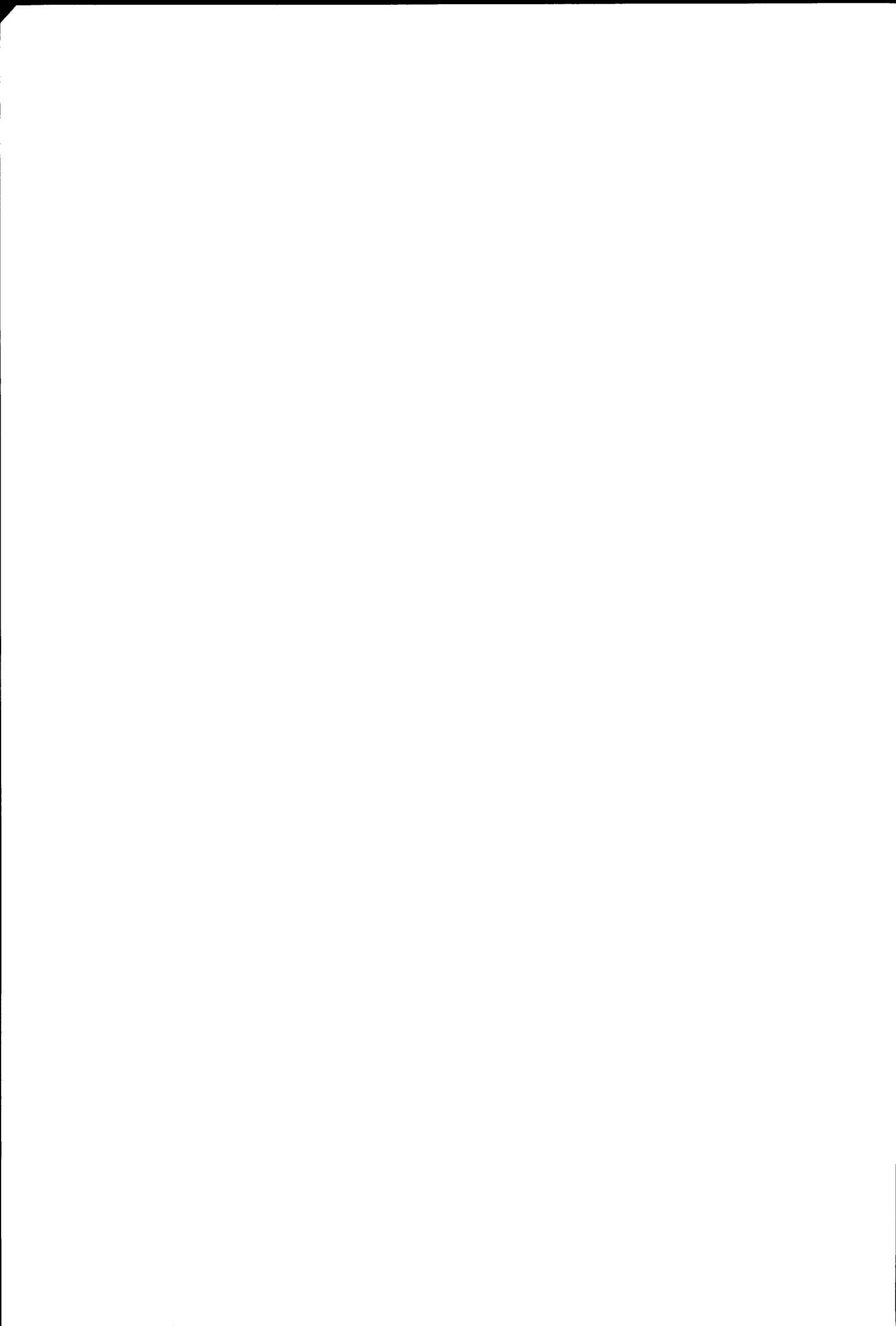
III b) Une teneur en TiO_2 inférieure à 1 % environ (répartition également dans le grain) paraît souhaitable. Des teneurs en TiO_2 supérieures à 1 % sont néfastes.

IV b) Le point de goutte qui peut être observé en service est un indice de qualité, charge à chaud ne suffit plus seule à caractériser la qualité. Cette remarque est valable également pour la résistance pyroscopique ou pour le point de goutte relatif aux briques neuves.

IV b) Le point de goutte qui peut être observé en service est un indice de qualité, mais il ne correspond cependant pas au point de goutte de la brique neuve. De légères différences de température du point de goutte (10 à 30 ° C) entraînent des différences considérables dans la tenue des briques.

Adresses des Auteurs

- | | |
|-------------------------------------|---|
| K. THOMAS
A. RISTOW
U. PLÖGER | Verein Deutscher Eisenhüttenleute,
Düsseldorf, Breite Straße 27 |
| K. KONOPICKY | Forschungsinstitut der Feuerfest-Industrie,
Bonn, Helmholtzstraße 27 |
| F. BASTENAIRE
M. BASTIEN | Institut de recherches de la sidérurgie,
185, rue Président-Roosevelt, St. Germain-en-Laye (Seine-
et-Oise) |
| J. BARON | Laboratoire de contrôle des produits réfractaires,
15, place Carnot, Nancy (Meurthe-et-Moselle) |
| D. SANNA | Station d'essais de l'Institut de recherches de la sidérurgie,
Maizières-lez-Metz (Moselle) |







ÉDITÉ PAR LE SERVICE DES PUBLICATIONS
DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

2057/2/58/1